

## Resum

---

Aquest projecte es basa en l'estudi dels elements que afecten a l'aerodinàmica d'un turisme de sèrie antic amb la ajuda de programes de càlcul numèric de dinàmica de fluids (CFD, per les sigles en anglès). L'objectiu de l'estudi és comparar el flux al voltant del vehicle del model de sèrie amb el model modificat i comprovar que el flux produeix una resistència a l'avanç menor amb les noves modificacions. A més a més, totes les modificacions s'aplicaran una a una per entendre el comportament de cada element per separat.

L'inici del projecte està format per una introducció a la aerodinàmica i el seu comportament en els turismes en concret. D'aquesta manera s'expliquen els elements més importants i la seva influència en el comportament aerodinàmic del vehicle. El model que s'ha utilitzat com a objecte d'estudi és un Fiat 128.

Pel modelatge del Fiat 128 s'utilitza el programa de disseny assistit per ordinador (CAD, per les seves sigles en anglès) *SOLIDWORKS 2015®* ja que aquest ha estat el que s'ha ensenyat al Grau realitzat (Enginyeria en Tecnologies Industrials). Seguidament, s'ha utilitzat el programa de simulació numèrica *FLUENT®* per l'estudi de CFD.

El model s'ha creat de forma totalment manual mitjançant uns plànols de les dimensions del vehicle i intentant apropar-se el més possible a la geometria real però sense excedir-se amb detalls innecessaris, com per exemple: els retrovisors, mànecs de les portes, etc.

Després de la creació del model, es passa a crear el mallat i es realitza la simulació del comportament aerodinàmic del turisme i, posteriorment, amb les modificacions a les diferents parts del vehicle.

Finalment, s'interpreten els resultats del coeficient de resistència a l'avanç i es conclou amb una valoració de si aquests resultats són acceptables tot tenint en compte la falta d'informació que hi ha a la web sobre la geometria dels vehicles i la limitació de recursos en els ordinadors de la universitat per la realització de càlculs CFD. Amb tot això, es pot concloure que s'han arribat a complir els objectius principals del projecte.

Millores aerodinàmiques en un turisme antic

## Índex

---

Resum .....	1
Índex.....	3
1. Glossari .....	6
2. Prefaci .....	7
2.1 Origen del projecte i una mica d'història .....	7
2.2 Motivació .....	7
3. Introducció .....	8
3.1 Objectius del projecte .....	8
3.2 Abast del projecte .....	8
4. Aerodinàmica dels turismes.....	10
4.1 Fonaments de la aerodinàmica .....	10
4.1.1. Principi de Bernouilli i equació de continuïtat .....	10
4.1.2 Capa límit.....	11
4.1.3 Forces i moments aerodinàmics .....	12
4.1.4 Centre de pressions .....	13
4.2 Distribució de pressions al voltant del vehicle.....	13
4.3 Cossos aerodinàmics .....	15
4.4 Elements que afecten la aerodinàmica d'un turisme .....	17
4.4.1 Para-xocs davanter .....	18
4.4.2 Capó i parabrises davanter .....	19
4.4.3 Sostre .....	20
4.4.4 Parabrises posterior i maleter .....	21
4.4.5 Laterals .....	22
4.4.6 Baixos i difusor .....	23
4.4.7 Rodes.....	25
4.4.8 Alerons i <i>spoilers</i> .....	25
5. Dinàmica computacional de fluids .....	28
5.1 Introducció al CFD .....	28
5.2 Creació del model.....	30
5.3 Creació de la malla .....	32
5.4 Condicions de contorn.....	36
5.5 Configuració de la solució.....	37
6. Anàlisi de resultats .....	41

7. Modificacions del model .....	51
7.1 Primera modificació .....	51
7.2 Segona modificació .....	54
7.3 Tercera modificació .....	56
7.4 Quarta modificació .....	59
7.5 Cinquena modificació .....	61
7.6 Sisena modificació .....	63
8. Planificació temporal i econòmica .....	66
8.1 Planificació temporal .....	66
8.2 Planificació econòmica .....	67
9. Estudi d'impacte ambiental .....	69
Conclusions .....	70
Agraïments .....	72
Bibliografia .....	73
Annex .....	75
A. Anàlisi complementari de resultats .....	75
A.1 Representació del camp de pressions .....	75
A.2 Representació del camp de velocitats .....	78
A.3 Representació de la turbulència .....	80
B. Primera modificació .....	85
B.1 Gràfic de residus i coeficients monitoritzats .....	85
B.2 Representació del camp de pressions .....	87
B.3 Representació del camp de velocitats .....	88
C. Segona modificació .....	88
C.1 Gràfic de residus i coeficients monitoritzats .....	88
C.2 Representació del camp de pressions .....	90
C.3 Representació del camp de velocitats .....	90
D. Tercera simulació .....	91
D.1 Gràfic de residus i coeficients monitoritzats .....	91
D.2 Representació del camp de pressions .....	93
D.3 Representació del camp de velocitats .....	93
E. Quarta modificació .....	94
E.1 Gràfic de residus i coeficients monitoritzats .....	94
E.2 Representació del camp de pressions .....	96
E.3 Representació del camp de velocitats .....	96
F. Cinquena modificació .....	97



F.1 Gràfic de residus i coeficients monitoritzats .....	97
F.2 Representació del camp de pressions.....	99
F.3 Representació del camp de velocitats .....	99
G. Sisena modificació .....	100
G.1 Gràfic de residus i coeficients monitoritzats .....	100
G.2 Representació del camp de pressions.....	102
G.3 Representació del camp de velocitats.....	102

## 1. Glossari

---

$a$	Velocitat del so
$A$	Àrea frontal
CAD	En angles: Computer Aided Design o Disseny Assistit per Ordenador
$C_D$	Coeficient de resistència al avanç
$C_L$	Coeficient de sustentació
$C_M$	Coeficient del moment de capcineig
$C_P$	Centre de pressions
EDP	Equació en derivades parcials
$G$	Centre de gravetat
$k$	Energia cinètica turbulenta
$L$	Dimensió característica
$M$	Moment de capcineig
$Ma$	Nombre adimensional de Mach
$P$	Pressió
$Re$	Numero adimensional de Reynolds
$U$	Velocitat del fluid
$z$	Cota d'energia potencial
$\rho$	Densitat del fluid
$\epsilon$	Rati de dissipació de l'energia cinètica turbulenta

## 2. Prefaci

---

### 2.1 Origen del projecte i una mica d'història

La funció de les carrosseries dels vehicles en el segle XIX era únicament la protecció d'efectes mediambientals com el vent i la pluja. En aquells temps els fabricants no es plantejaven la necessitat de millorar l'aerodinàmica i es creaven vehicles amb les rodes molt altes i unes parts frontals molt quadrades. No va ser fins als inicis del segle XX que es va començar a tenir en compte l'aerodinàmica en el disseny dels vehicles, tot i que aquestes metodologies no s'aplicaven en la indústria automobilística, sinó en la indústria nàutica i aeronàutica sobretot.

El primer vehicle que es va dissenyar amb intenció de reduir el seu coeficient de resistència a l'avanç va ser al 1921 amb un vehicle anomenat *Rumpler Tropfenwagen*. Aquest vehicle destacava per arribar a un coeficient de resistència a l'avanç de només 0.28.

Però no va ser fins a la crisi del petroli del 1973 quan realment es va començar a preocupar en disminuir el combustible i les emissions; i per assolir-ho es va treballar sobretot en la aerodinàmica i el pes del vehicle.

En aquests últims anys, hi ha hagut una conscienciació mundial sobre reduir els efectes de la contaminació per tal d'evitar les conseqüències que produeixen al canvi climàtic. Per tant, al dissenyar un vehicle, es busca arribar a un coeficient de resistència a l'avanç el més baix possible per tal de reduir els costos en benzina, entre altres coses. Aconseguir aquest baix coeficient juntament amb una bona estètica és el que busquen tots els enginyers en crear un model.

### 2.2 Motivació

El tema d'aquest treball de final de Grau ha estat elegit per l'interès del món de la automoció i de la curiositat de saber el perquè de les formes que formen un turisme per l'exterior, així com el disseny d'un vehicle i la seva simulació numèrica. Relacionant aquests interessos més els conceptes apresos sobre mecànica de fluids durant el Grau en Enginyeria Industrial, neix la idea sobre la qual tracta el projecte.

El treball recopila aquests coneixements en un estudi on es realitza un disseny del model en un programa de disseny assistit per ordinador (CAD) i s'analitzarà el comportament del mateix travessant un flux d'aire amb un programa de dinàmica computacional de fluids (CFD).

### 3. Introducció

---

#### 3.1 Objectius del projecte

A l'hora de definir el tema del projecte, el primer objectiu que es planteja és posar en pràctica els coneixements apresos durant el Grau i conèixer com es comporten els vehicles amb la interacció d'un flux d'aire semblant al de la vida real. Amb la finalitat d'aplicar aquests coneixements a l'àmbit de la automoció per tal d'entendre i saber aplicar futures millores en el comportament aerodinàmic general d'un turisme.

Per portar a cap aquest objectiu serà necessari calcular forces, moments, centres de massa i alguns coeficients aerodinàmics, com per exemple el de resistència a l'avanç (CD) o el de sustentació (CL). D'aquesta manera, es podrà treure una conclusió quantitativa i científica de quin és el comportament aerodinàmic del vehicle.

Per tal de complir aquests objectius, es plantegen uns altres objectius secundaris, però no menys importants, entre els quals s'inclou el perfeccionament de les habilitats de treball amb el programa CAD utilitzat. Aquest objectiu és vital per tal d'obtenir un model aproximat de la realitat i obtenir bons resultats. D'altra banda, s'aprendrà a utilitzar el programa de CFD des del principi i els passos necessaris per llançar una simulació en 3D. Aquest últim objectiu representa un gran pas respecte les simulacions vistes durant el grau, ja que en aquest només s'aventura a llançar simulacions ja preparades i en 2D.

#### 3.2 Abast del projecte

Un estudi com aquest s'utilitza a les empreses del sector de l'automoció com a complement a assajos en un túnel de vent i proves en circuits tancats, i és en aquest sentit on té importància realitzar un estudi aerodinàmic amb simulació numèrica. Ja que quan es realitza a posteriori una simulació numèrica es poden evitar costos innecessaris com fabricar e instal·lar peces que no aporten els resultats esperats. En aquest cas, s'ha optat per utilitzar com a model d'estudi el Fiat 128 que es va fabricar entre els anys 1969 i 1990, concretament la versió redissenyada coneguda com Europa, fabricada entre el 1979 i 1982.

S'ha escollit un vehicle antic amb unes característiques aerodinàmiques dolentes ja que donarà més possibles variacions en el disseny que un vehicle més recent en el qual ja s'han considerat molts factors per millorar la aerodinàmica. En la figura 3.1 es mostra una sèrie de vehicles antics juntament amb el seu coeficient de resistència a l'avanç (el Fiat 128 entre ells) segons la font *"Club Alfa Sport"*.

Finalment, els passos que es seguiran per la realització d'aquest projecte són els següents:

- Repàs dels fonaments de l'aerodinàmica que es basen els automòbils.
- Estudi teòric on s'analitzarà la influència dels elements un per un en el comportament aerodinàmic d'un turisme.

- Creació del model en CAD, implementació del model amb CFD i el càlcul de la solució.
- Anàlisi dels resultats obtinguts i optimització del disseny amb els coneixements obtinguts.
- Realització d'una planificació temporal i econòmica.
- Estudi del impacte mediambiental.

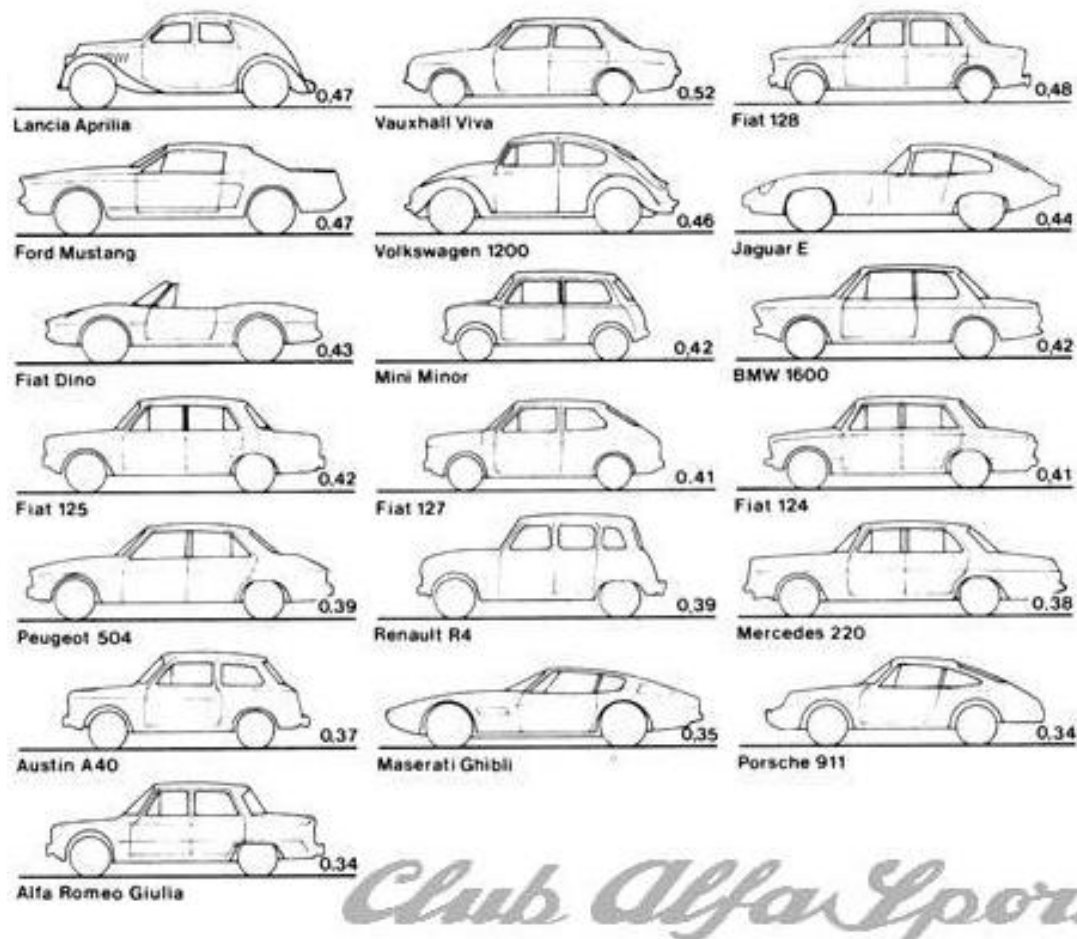


Figura 3.1. Coeficients de resistència al avanç de diferents vehicles antics segons Club Alfa Sport

## 4. Aerodinàmica dels turismes

### 4.1 Fonaments de la aerodinàmica

#### 4.1.1. Principi de Bernoulli i equació de continuïtat

El principi de Bernoulli descriu el comportament de la velocitat i pressió d'un fluid quan apareix una variació de secció al seu pas.

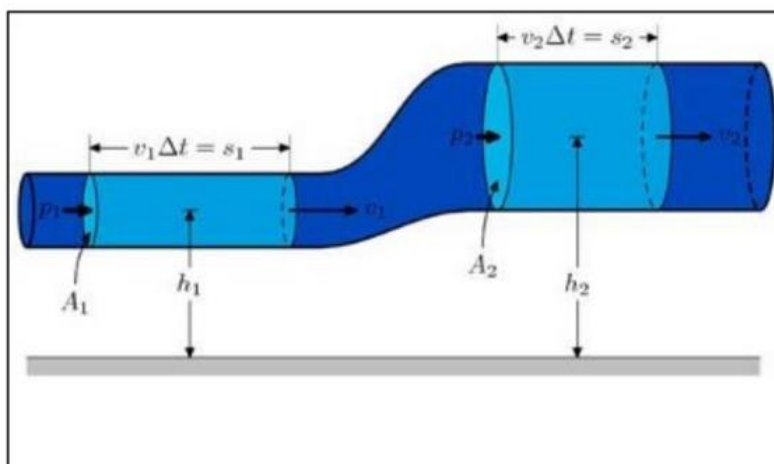


Figura 4.1. Diagrama del principi de Bernoulli.

L'equació que explica aquest fenomen és la següent, a la qual s'expressa de forma matemàtica, que l'energia del flux, composta per l'energia estàtica de pressió, la cinètica i l'energia potencial gravitatòria, és sempre constant:

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g y = \text{constant} \quad (1)$$

Si se suposa que no hi ha variació d'altura entre el punt inicial i el punt final de una línia de corrent en el recorregut del flux, d'aquesta equació es pot deduir que quan la velocitat del flux disminueix, la seva pressió augmenta, i viceversa.

El mateix passa amb l'àrea o secció de pas, degut a la equació de continuïtat (2) per un flux incompressible i estacionari:

$$\sum_i A_i \cdot v_i (\text{entrada}) = \sum_i A_i \cdot v_i (\text{salida}) \quad (2)$$

Aquesta equació és la que justifica la conservació del cabal d'un flux, ja que ha d'existir una conservació de la massa. Per tant, el cabal que entra al nostre volum de control serà igual que el que surt. Sabent que el cabal és el producte de la velocitat mitja per el pas d'àrea o secció de pas, es dedueix que si l'àrea augmenta, la velocitat decreix.

En el nostre cas, aquests principis s'apliquen de la forma que es mostra a la figura 4.2, on s'observa que a la part frontal hi ha més àrea, per tant, per l'equació de continuïtat, menys velocitat i, per equació de Bernoulli, alta pressió.

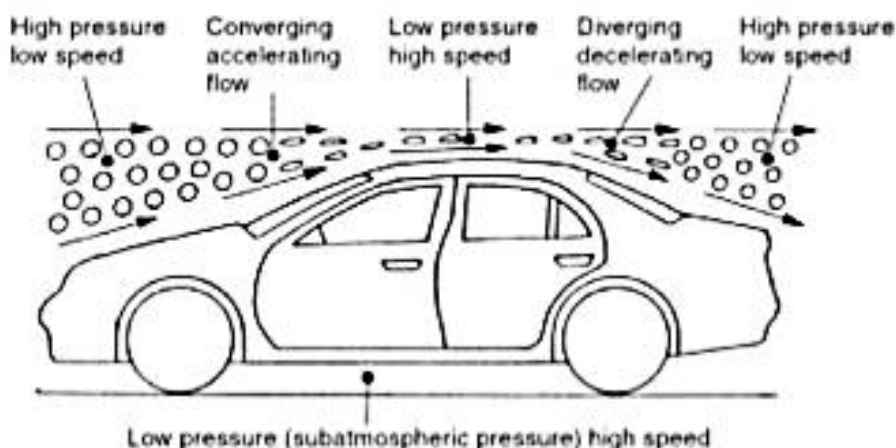


Figura 4.2. Representació de la continuïtat del flux en un vehicle

#### 4.1.2 Capa límit

La fricció d'un fluid viscos sobre la superfície d'un sòlid o paret provoca que les partícules que estan en contacte amb el sòlid tinguin velocitat nul·la. Això provoca que hi hagi un gradient de velocitats ja que hi ha una discontinuïtat entre la velocitat de l'infinit i la velocitat zero de la superfície. A la distribució de velocitats entre aquest punt de contacte i la velocitat de l'infinit s'anomena capa límit. A la figura 4.3 mostra un dibuix de la formació de la capa límit.

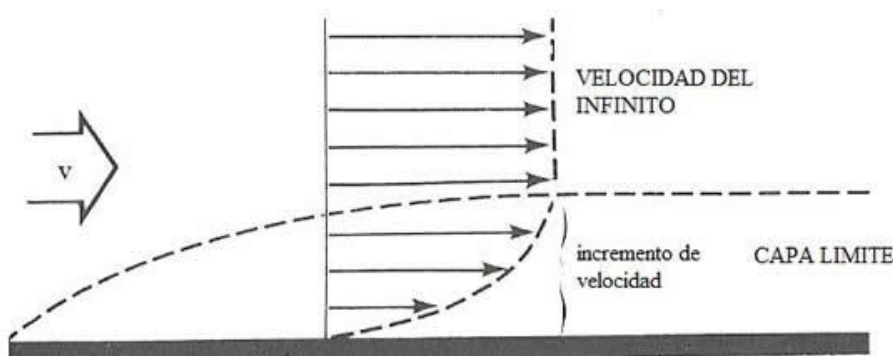


Figura 4.3. Formació de la capa límit

La capa límit va augmentant a mesura que avança per la superfície fins a arribar a un límit que es queda amb un valor d'altura  $\delta$ , sent aquest valor el gruix de la capa límit. Fora de la capa límit, tot i que el fluid sigui viscos, no es produeix intercanvi de la quantitat de moviment entre partícules perquè el gradient de velocitats és nul.

A la pràctica, és difícil situar el punt on comença la capa límit, així que s'acostuma a definir el punt el qual la velocitat és el 99% de la velocitat de flux a l'infinit.

Els efectes tallants que apareixen a la superfície de la placa plana són els que defineixen la força de fricció que apareix en el cos a causa del contacte amb el fluid i, en conseqüència, són també els que defineixen el coeficient de resistència a l'avanç degut a aquesta fricció.

### 4.1.3 Forces i moments aerodinàmics

Un sòlid rígid qualsevol submergit en un fluid rep un total de tres forces i tres moments, tal i com s'observa a la figura 4.4 .

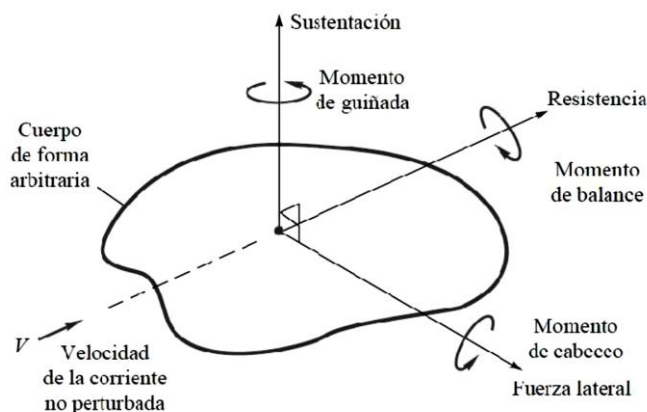


Figura 4.4. Forces i moments en un sòlid rígid a l'espai

En el cas particular dels vehicles, considerant una simetria transversal, només rep dos forces, la de resistència i la de sustentació, i un moment, el de capcineig. La força de resistència a l'avanç o *drag* és la que rep el cos contra el fluid en la direcció oposada a la seva velocitat o en la direcció del flux. Aquesta força és la que es buscarà reduir en major mesura ja que és que s'encarrega de frenar el vehicle i, per tant, augmentar el consum de combustible. La força de sustentació o *lift* es produeix en la direcció perpendicular al terra i és la que tendeix a aixecar el vehicle del terra fent que perdi adherència i tracció a les rodes.

Les forces i el moment es defineixen matemàticament de la següent manera:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A$$

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A$$

$$M = \frac{1}{2} \cdot C_M \cdot \rho \cdot U^2 \cdot L \cdot A$$

On  $F_D$ ,  $F_L$  i  $M$  són les forces de *drag* i *lift* i el moment de capcineig respectivament,  $\rho$  i  $U$  representen la densitat i la velocitat del fluid, la  $L$  és la longitud característica i  $C_D$ ,  $C_L$  i  $C_M$  són els coeficients aerodinàmics de resistència a l'avanç, sustentació i moment de capcineig. Finalment,  $A$  és la superfície característica de cada cos que es pot dividir en tres grups:

- Àrea frontal: àrea del cos vista des de la direcció del corrent de fluid. Aquesta s'utilitza en el cas d'esferes, cilindres, cotxes, projectils, etc.
- Àrea de planta: àrea del cos vista des de dalt. S'utilitza per cossos amples i estilitzats, com el cas de perfils alars.
- Àrea mullada: correspon a l'àrea del cos que està en contacte amb el fluid. Aquesta s'utilitza en el cas d'embarcacions.



#### 4.1.4 Centre de pressions

El centre de pressions és el punt on s'apliquen els esforços aerodinàmics, és a dir, la força de resistència a l'avanç, la força de sustentació i el moment de capcineig, i és molt útil per determinar el comportament del vehicle.

La localització del centre de pressions pot variar depenent de les pressions que es requereixin, per exemple en un cotxe de competició, el centre de pressions estarà situat a un punt en el que la subjecció a la carretera sigui màxima a les corbes, mentre que en un turisme ha de ser tal que garanteixi el confort dels passatgers i la maniobrabilitat i estabilitat del vehicle.

Així doncs, si el centre de pressions en un turisme coincideix amb el centre de gravetat, el moment de capcineig serà nul i el cotxe serà completament estable. D'altra banda, si el centre de pressions està més endarrerit que el centre de gravetat, el vehicle tendirà a marxar de la part de davant i patirà subviratge. Finalment, si el centre de pressions està més endavant, el vehicle se n'anirà de la part de darrere i patirà sobreviratge. Tot i aquests graus d'instabilitat que pot patir un vehicle, un cop ja dissenyat la carrosseria, es pot compensar repartint els pesos de la maquinaria interior de manera que s'elimini cap possibilitat de perill i instabilitat a la conducció.

#### 4.2 Distribució de pressions al voltant del vehicle

Per a l'estudi de les pressions, s'utilitzarà com a base la imatge 4.5, on es mostra experimentalment els coeficients de pressió dibuixats perpendicularment a la superfície. El signe de les pressions es positiu o negatiu en relació a la  $P_{amb}$  mesurada a una distància del vehicle.

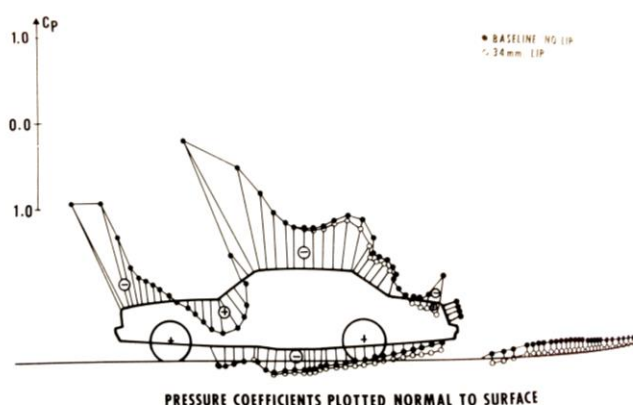


Figura 4.5. Coeficients de pressió sobre la superfície del vehicle

En primer lloc, podem observar que es forma una pressió negativa molt gran a la part frontal del capó però que va disminuint degut al flux aixecant-se per sobre el front del vehicle. Aquest gradient advers de pressió en aquesta regió té el potencial de crear *drag* en aquesta àrea. En els últims anys, s'ha donat molta importància en el estil d'aquesta part per evitar una possible separació al capó i a la penalització de *drag* que comporta.

A la base del parabrises, el flux hauria de pujar cap amunt però, com és incapaç de fer-ho, experimenta un increment de pressió. Aquesta zona d'alta pressió és una localització ideal per introduir entrades d'aire per la ventilació del motor o per l'aire condicionat. Mitjançant l'equació de Bernoulli, deduïm que té unes velocitats molt baixes i, per tant, ajuda que els eixugaparabrises no siguin afectats per les forces aerodinàmiques.

Per sobre la línia del sostre, la pressió es torna negativa altre cop degut que el flux tendeix a seguir el contorn del sostre. Al final del sostre, torna a haver una zona que tendeix a presentar una separació de la capa límit. Degut a les baixes pressions d'aquesta àrea, el flux que flueix pels voltants tendeix cap a la part posterior del vehicle afegint més potencial per a que es separi. La combinació del flux provinent del sostre amb el dels laterals forma unes turbulències al darrere del turisme, tal i com podem veure a la imatge 4.6.

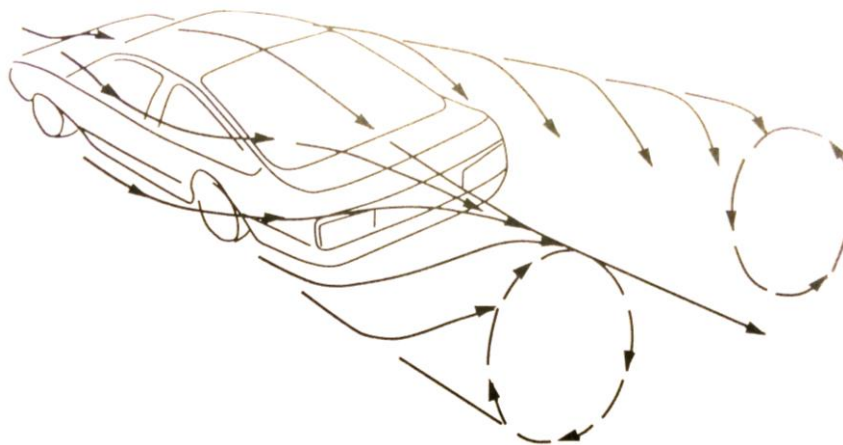


Figura 4.6. Vòrtex formats darrere un vehicle

Les pressions que tenen lloc a la superfície, no només tenen efecte en el *drag*, sinó que també afecta directament al *lift*. Un control del flux que minimitzi l'àrea de separació, generalment, resulta en un *lift* més aerodinàmic. La figura 4.7 il·lustra l'efecte en el *lift* i *drag* per 4 estils de vehicle.

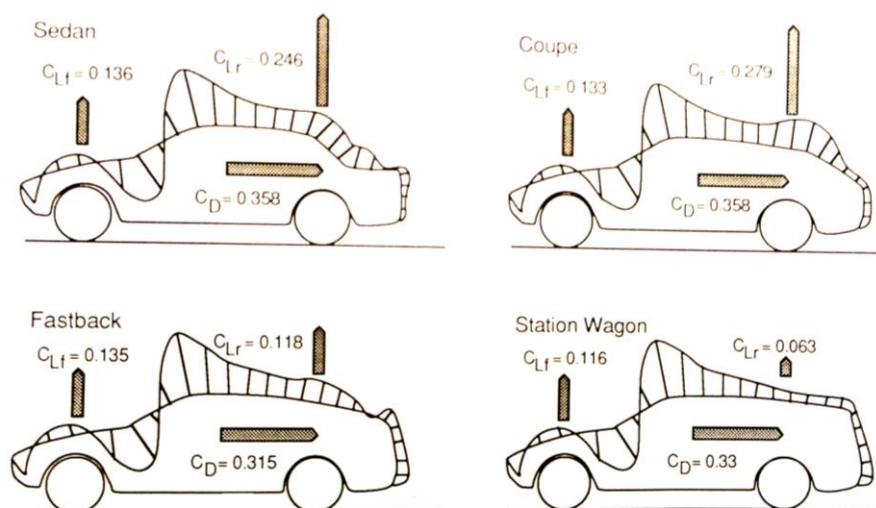
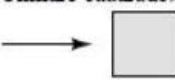


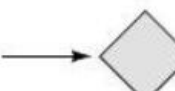
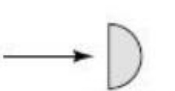
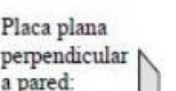
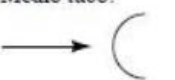
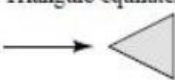
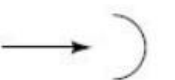
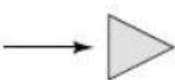
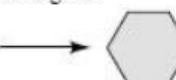


Figura 4.7. Lift i drag per diferents geometries de vehicles

### 4.3 Cossos aerodinàmics

Com s'ha explicat en els apartats anteriors, hi ha dos tipus de components que afecten a la resistència a l'avanç o  $c_d$ : la *resistència de fricció* i la *resistència de pressió*. La contribució de cada una depèn de la geometria del cos i la seva espessor.

La taula 4.1 es pot observar el  $c_d$  basat en l'àrea frontal resultant de diferents geometries senzilles per un nombre de Reynolds  $>10^4$ .

Forma	$C_D$ basado en el área frontal	Forma	$C_D$ basado en el área frontal	Forma	$C_D$ basado en el área frontal
Cilindro cuadrado:		Medio cilindro:		Placa:	
 2,1		 1,2		 2,0	
 1,6		 1,7		Placa plana perpendicular a pared:	
Medio tubo:		Triángulo equilátero:		 1,4	
 1,2		 1,6			
 2,3		 2,0		Hexágono:	
				 1,0	0,7

Taula 4.1. Coeficient de resistència al avanç per diferents geometries bàsiques

Es pot observar amb la taula anterior que quan menor sigui la zona frontal d'estancament, menor serà el coeficient de resistència a l'avanç. En el cas de la placa vertical, tota la resistència a l'avanç es deu a la resistència de pressió. Just el cas contrari és una placa horitzontal, on tota la resistència al avanç és creada per la resistència de fricció al desprendre's la capa límit. Això es pot observar a la figura 4.8.

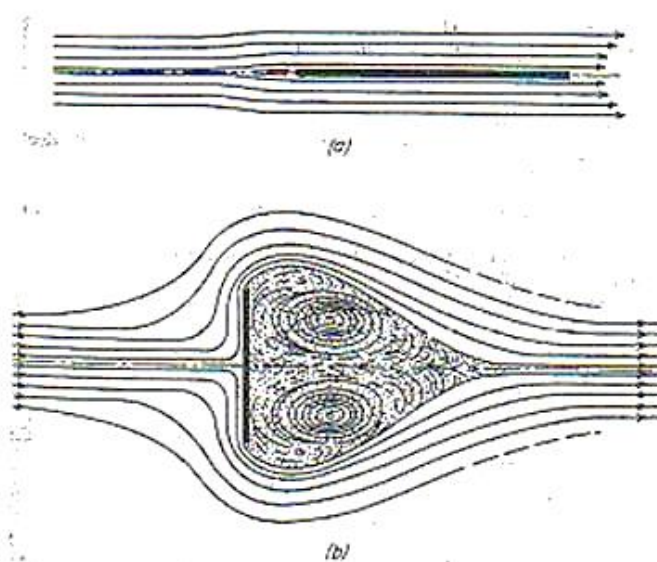


Figura 4.8. Despreniment de la capa límit en una placa plana

Tots els cossos de la taula 4.1 deixen una estela diferent per cada geometria i tots aquests efectes també es produeixen en l'aerodinàmica dels vehicles. Tal i com es pot observar a la figura 4.9 i la figura 4.10, la geometria de la part posterior d'un vehicle es pot identificar en quatre tipus: *Fastback*, *Hatchback*, *Notchback* i *Squareback*. Cada un d'aquests tipus pateix una separació del flux a una zona diferent, deixant una estela i uns vòrtex característics, i obtenint una eficiència aerodinàmica diferent en cada cas.

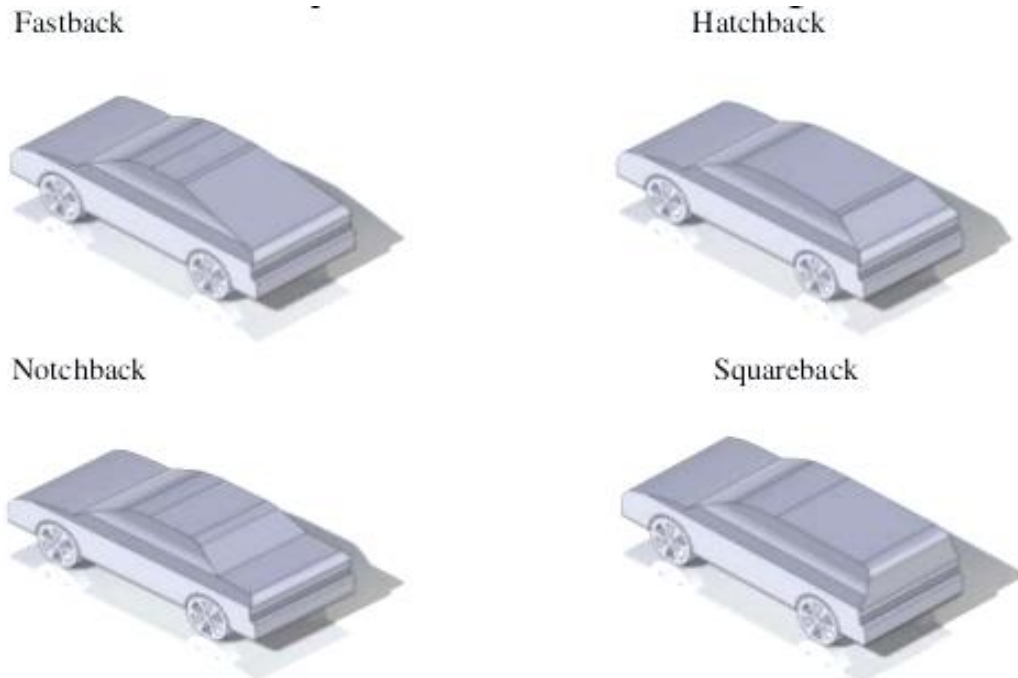


Figura 4.9. Diferents tipus de vehicles depenent de la part posterior

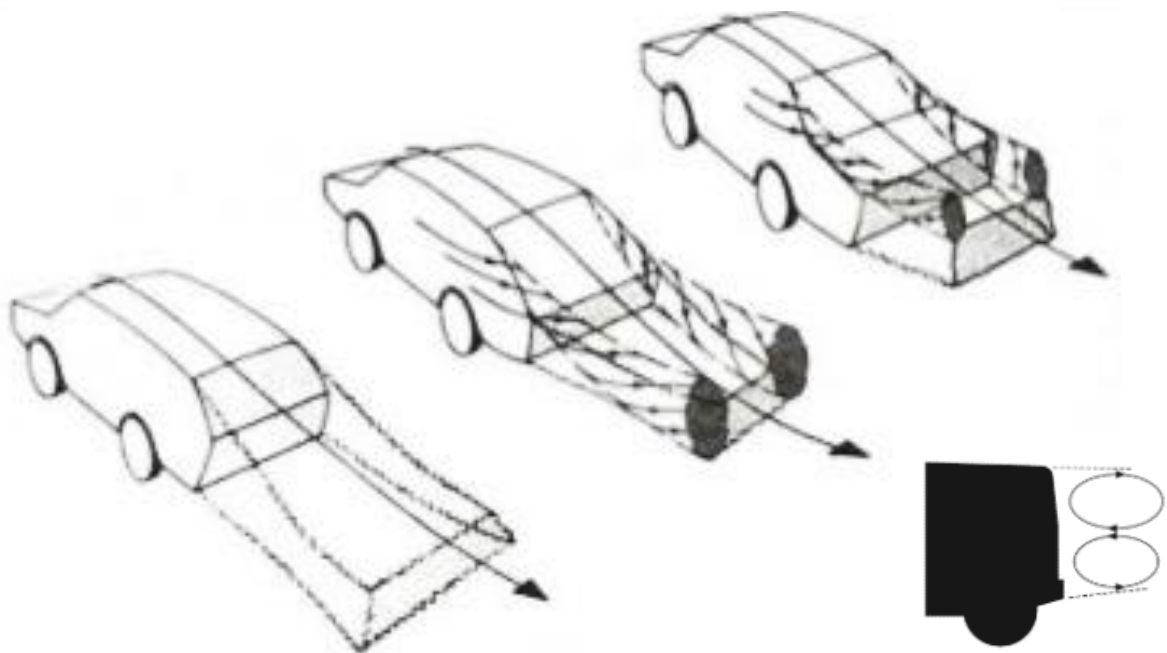


Figura 4.10. Forma dels vòrtex que es produeixen per cada tipus de vehicle

La forma més aerodinàmica que es coneix és la d'una gota d'aigua al caure, amb el seu extrem ample al davant. Traslladat als automòbils, l'ideal seria un model llarg i estret, amb un frontal baix, un lateral ascendent i una part posterior alta i massissa. Les *berlines* i els *coupés* són els cotxes que més s'apropen a aquesta arquitectura optima.

Tal i com es mostra a la figura 4.11, el coeficient de resistència a l'avanç es va reduint a mesura que ens apropem a la forma de gota degut a una menor zona turbulenta.

En el cas dels automòbils no resulta possible fer un repartiment exacte de la contribució dels diferents elements que configuren el vehicle a la aerodinàmica. Si es pot, però, tenir una certa estimació sobre les diferents contribucions en un cotxe de sèrie sobre la resistència aerodinàmica tal i com es mostra a la següent taula 4.2.

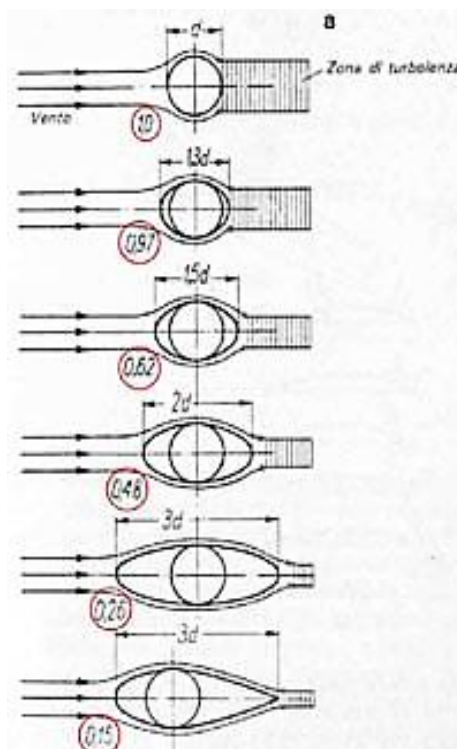


Figura 4.11.  $C_D$  en funció de la geometria

Resistència de fricció més efecte dels baixos	26%
Resistència de pressió (causada pel despreniment de la capa límit)	35%
Resistència de les rodes	26%
Resistència associada al sistema de refrigeració del motor	10%
Resistència induïda	3%

Taula 4.2. Influència de cada element a la resistència al avanç

Els tres primers termes són comparables entre sí, i encara que la resistència de pressió acostumi a ser major que les altres, no és suficient intentar ajustar només aquesta part. Per aconseguir disminuir la resistència en grans mesures, és necessari actuar també en els altres dos factors.

#### 4.4 Elements que afecten la aerodinàmica d'un turisme

En aquest capítol es realitzarà un estudi de com les formes de diferents components i mesures amb les que dotem un vehicle pot arribar a influir en els coeficients aerodinàmics. Generalment, al intentar optimitzar el comportament aerodinàmic d'un vehicle, es busca reduir el coeficient de resistència a l'avanç sense afectar negativament a l'estètica, l'estabilitat i el consum.



Quan es dissenya un vehicle no només s'ha de tenir en compte que les condicions estètiques i els coeficients aerodinàmics siguin bons. Un altre factor que té molta importància és la seguretat (activa i passiva) que ha de proporcionar cada zona del vehicle en cas d'un accident o d'un atropellament. Per tant, en un model real no es poden realitzar totes les modificacions que es podrien arribar a imaginar perquè no estarien dintre de les normes de circulació.

#### 4.4.1 Para-xocs davanter

El para-xocs és el primer element d'un turisme amb el que contacta l'aire. Aquest element és molt important ja que s'encarrega de redirigir el flux a les altres parts del vehicle. Tal i com s'ha considerat a la simulació numèrica, si no es tenen en compte les entrades d'aire de ventilació el flux pateix un punt d'estancament a la part davantera del vehicle i una àrea d'altres pressions que l'envolten.

Generalment, l'arrodoniment de la part frontal és el que estableix l'àrea on la pressió dinàmica pot actuar induint *drag*. A la figura 4.12 i 4.13 es mostra la variació del *drag* en funció de la relació del punt d'estancament i la altura del vehicle. El mínim *drag* s'obté quan el punt d'estancament està situat a la part més inferior del vehicle, concretament, en un 10% de l'altura. Un bon arrodoniment d'aquesta part, en contrast amb els vehicles antics com el que s'ha estudiat en aquest projecte, és igualment important per reduir la resistència aerodinàmica. Una línia de capó arrodonida i baixa pot arribar a reduir fins a un 15% en el total de coeficient de *drag*.

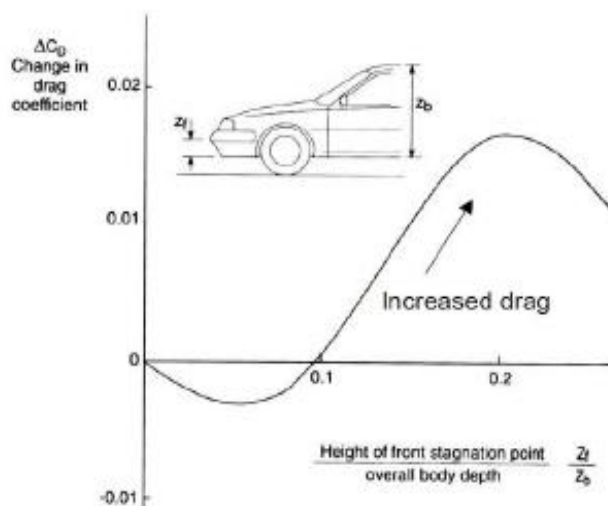


Figura 4.12. Variació del drag en funció de la relació mostrada

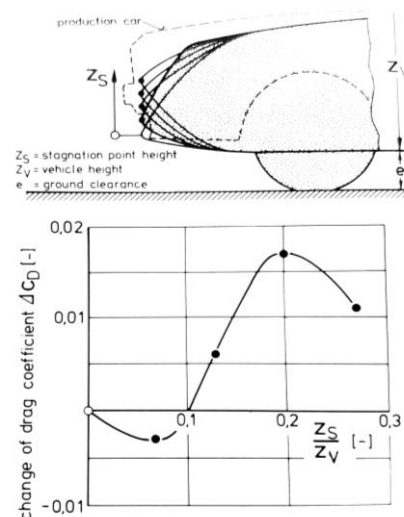


Figura 4.13. Variació del drag en funció de la relació mostrada

Els cantons vius a la carrosseria del vehicle produeixen una separació del flux i, conseqüentment, una pèrdua d'eficiència aerodinàmica. A la figura 4.14 es mostren diferents dissenys de parts frontals d'un vehicle. Relacionant-ho amb la figura anterior, es pot concloure que un bon arrodoniment d'aquestes cantonades vives provoca un punt

d'estancament baix amb una millora de la distribució del flux al seu voltant i, per tant, una reducció del coeficient de resistència a l'avanç.

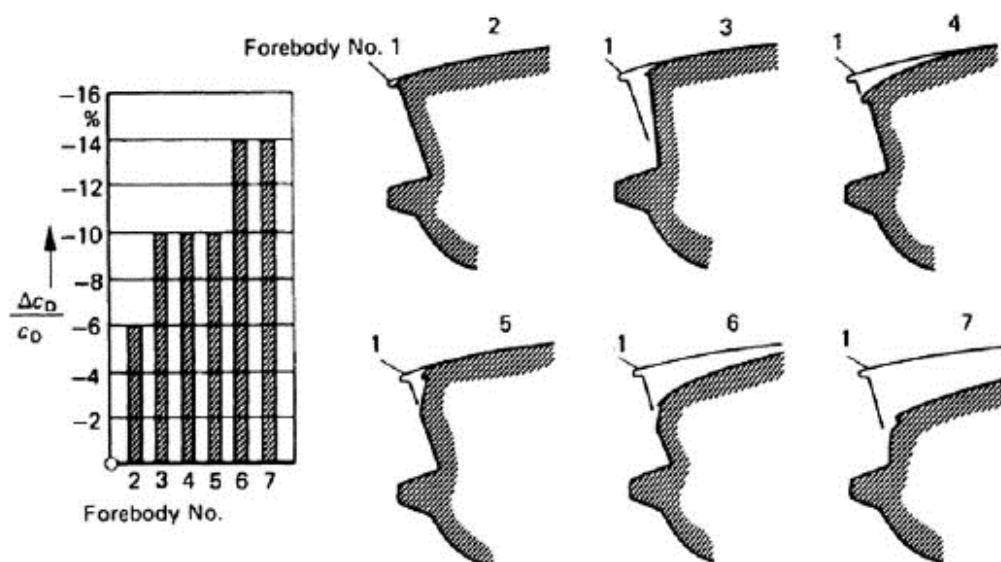


Figura 4.14. Percentatge de reducció del  $C_D$  en funció de la geometria del morro del vehicle

#### 4.4.2 Capó i parabrises davanter

La segona zona on s'observa una separació de la capa límit és a la base del parabrises davanter i aquí una solució pràctica pel problema és més difícil d'assolir. La principal influència sobre el coeficient de resistència a l'avanç és el pendent del parabrises. Però els angles amb molt pendent dissenyats per a una gran eficiència aerodinàmica no només presenten problemes de reducció d'espai a la cabina del conductor, sinó que també presenta problemes amb els reflexes de llum solar i poca transmissió de llum. La figura 4.15 demostren els beneficis que es poden aconseguir canviant el pendent del capó i el parabrises.

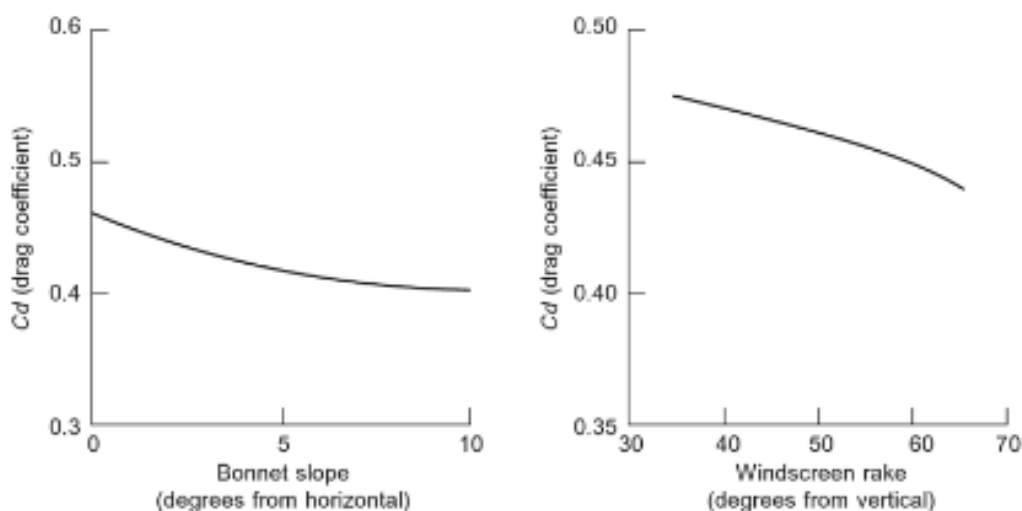


Figura 4.15. Variació del  $C_D$  en funció de l'angle del capó i el parabrises

L'angle del capó influeix en el gradient de pressió d'aquesta zona i es essencial per mantenir enganxat el flux a la superfície del vehicle. De la figura 4.16 es pot concloure que únicament és necessari arribar a un angle de  $10^\circ$  respecte la horitzontal per reduir el màxim el coeficient aerodinàmic. Després d'aquest angle, el comportament en aquesta zona no varia de forma significativa.

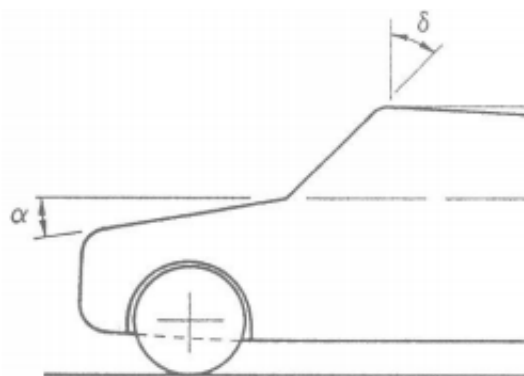


Figura 4.16. Angles del capó i parabrises

L'angle del capó respecte la vertical és inversament proporcional a l'increment de *drag*, però no es recomana que sigui major de  $65^\circ$  per les raons citades anteriorment.

#### 4.4.3 Sostre

El sostre és l'encarregat de garantir una transició suau del flux de la part davantera a la part posterior. Aquest sostre ha d'estar dissenyat per mantenir el flux enganxat al vehicle, evitant així una separació del flux.

Tot i que s'augmenti l'àrea frontal, per tal de reduir el coeficient de resistència a l'avanç, s'utilitza una curvatura en el sostre. Aquesta curvatura no pot ser molt gran, perquè sinó el  $C_d$  pot tornar a augmentar, tal i com es mostra a la figura 4.17.

Un altre benefici que es pot obtenir en aquesta zona és tenir uns grans radis de curvatura a les unions entre parabrises i sostre. D'aquesta manera, els gradients de pressió són petits i les possibilitats que se separi la capa límit disminueixen.

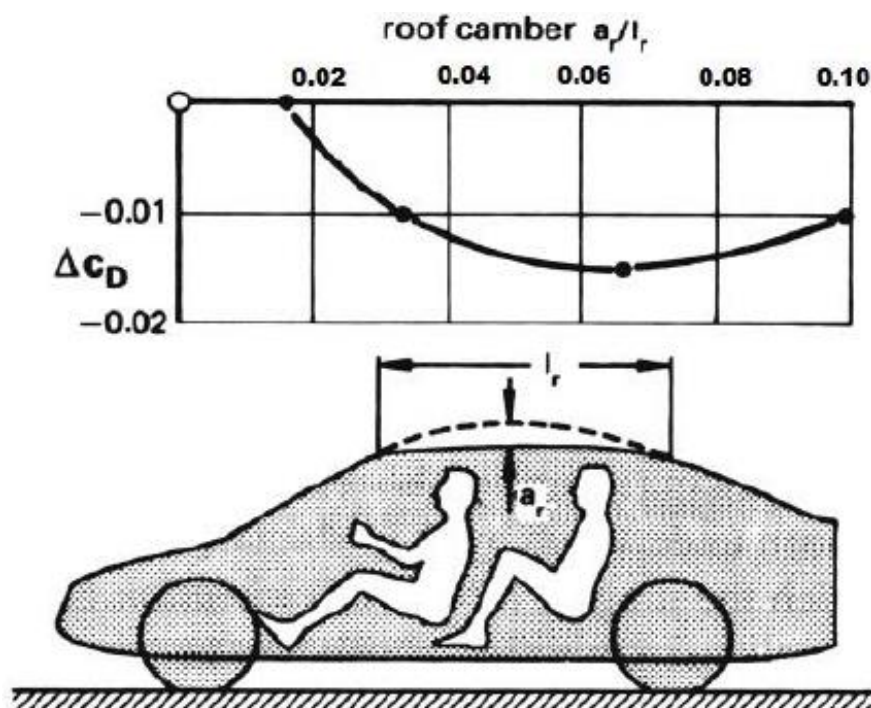


Figura 4.17. Variació del  $C_D$  en funció de la relació del sostre



#### 4.4.4 Parabrises posterior i maleter

Tal i com s'ha explicat en el apartat: 4.3 *Cossos aerodinàmics*, els turismes es poden classificar en 4 tipus: *Fastback*, *Hatchback*, *Notchback* i *Squareback*. En cada una d'aquestes categories de turismes la optimització de la resistència a l'avanç té unes característiques diferents.

La funció del parabrises posterior en els vehicles tipus *Notchback* és, com en els elements anteriors, mantenir el flux enganxat en la carrosseria. Per a l'estudi de l'optimització d'aquests vehicles s'utilitzen 3 paràmetres, que són: l'angle del parabrises posterior ( $\gamma$ ), l'altura del maleter ( $z$ ) i la longitud del maleter ( $x$ ). A la figura 4.18 es mostra com influencia cada un d'aquests paràmetres en un turisme *Notchback*.

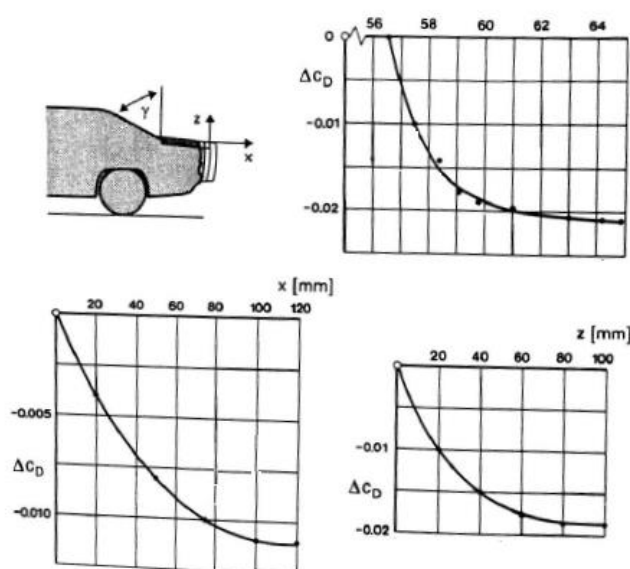


Figura 4.18. Variació del  $C_D$  en funció dels valors:  $x$ ,  $z$  i  $\gamma$

En el cas dels turismes *Fastback*, *Hatchback* i *Squareback*, els resultats obtinguts en variar la inclinació del parabrises posterior es mostra en la figura 4.20. Si l'angle respecte la horitzontal és més gran que  $35^\circ$ , el valor de  $C_D$  és 0.4 i es manté constant si aquest augmenta.

En canvi, per un valor d'angle més petit que  $35^\circ$ , es pot augmentar o reduir el *drag*. Hi ha una regió, entre els angles  $25^\circ$  i  $33^\circ$ , que el coeficient de resistència a l'avanç augmenta fins a valors d'un 10% degut a la creació de vòrtex.

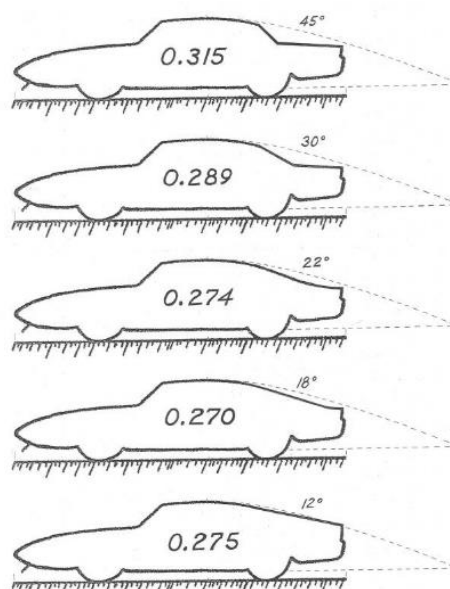


Figura 4.19. Variació del  $C_D$  en funció de l'angle

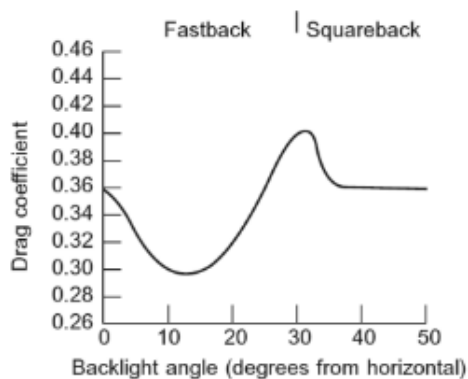
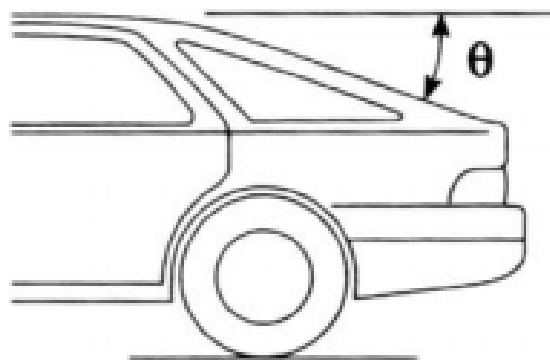
Figura 4.20. Variació del  $C_D$  en funció de l'angle

Figura 4.21. Angle d'estudi

A més a més, s'ha de prendre atenció a una tècnica que va lligada als laterals del maleter i que resulta ser una de les més efectives per reduir el *drag*. Aquesta tècnica consisteix en estrènyer la part posterior del maleter per minimitzar el volum de les turbulències creades. Tal i com es mostra a la figura 4.23, quan més gran és la distància  $y$ , més es redueix el *drag*.

En el cas d'una configuració extrema en la que la cua s'allarga fins a un punt amb la finalitat de reduir l'estela del tot, també augmentaria la resistència per fricció al llarg de tota la superfície. Consideracions pràctiques impedeixen que es dugui a terme aquest tipus de geometries però és ben sabut que el truncament d'aquests dissenys de cues es manifesta en només una petita pèrdua d'eficiència aerodinàmica.

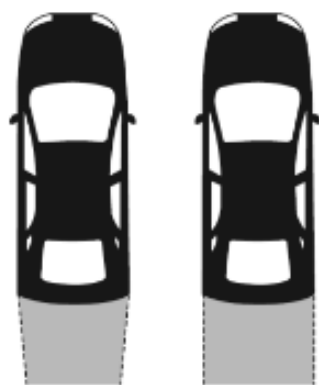
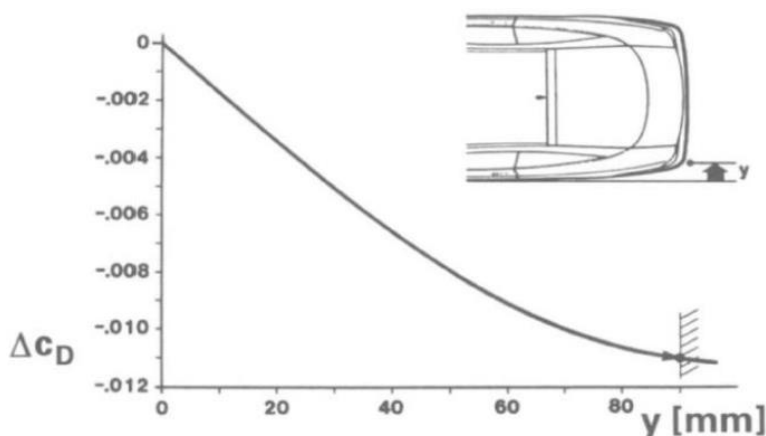


Figura 4.22. Estela formada pel vehicle

Figura 4.23. Variació del  $C_D$  en funció del paràmetre  $y$ 

#### 4.4.5 Laterals

Quan es busca reduir el coeficient de resistència a l'avanç el que es busca és millorar el moviment del flux al voltant del cotxe. Amb aquest propòsit, i de la mateixa manera que amb el sostre, s'arrodoneix els laterals del vehicle. D'aquesta manera s'aconsegueix que el flux es mantingui enganxat a la carrosseria al llarg del vehicle amb la finalitat de poder aplicar la tècnica del *boat-tailing* i reduir l'estela del darrere. A la figura 4.24 es mostra la variació del  $C_d$  en funció de la curvatura dels laterals.

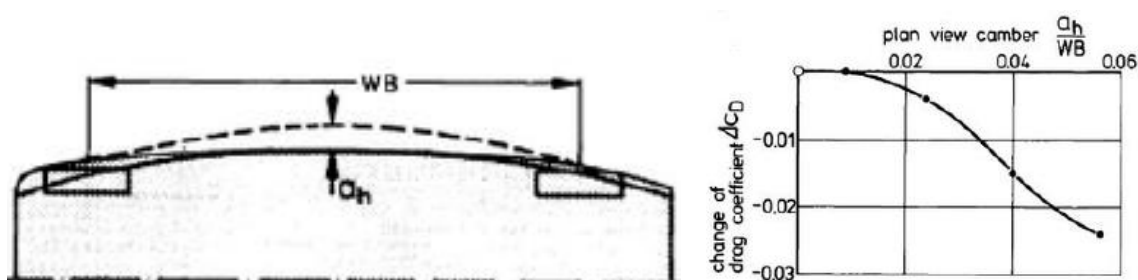


Figura 4.24. Variació del  $C_D$  en funció de la curvatura del lateral

De la mateixa manera que passa amb el sostre, si augmentem excessivament la curvatura del lateral pot tenir un efecte no desitjat en el *drag*, provocat per un augment de l'àrea frontal.

#### 4.4.6 Baixos i difusor

El flux per la part de sota del vehicle és molt complicat i depèn de varis factors com la distància entre el vehicle i la superfície del terra i la presència de un bon carenat a la part posterior. En el cas d'un vehicle en marxa per una carretera, el terra es pot considerar que està estacionari respecte el flux d'aire que rep el vehicle, com a mínim si no hi ha vent. En aquest cas, començant des del punt d'estancament A, la capa límit s'espesseix gradualment tal i com es mostra a la figura 4.25. Fora la capa límit, la velocitat del flux és diferent de la que caracteritza el flux lliure i, per tant, aquesta zona del flux no està estacionària respecte la carretera. Això genera que, a partir del punt G, apareix una segona capa límit en el terra.

Depenent de la distància entre el vehicle i el terra, les dos capes límit es poden trobar en el punt H o seguir separades. En el primer cas, el flux es bloqueja i l'aire que circula per la part inferior del vehicle tendeix a moure's amb ell, donant lloc a la creació d'una altra capa límit que comença a L. Entre els punts H i L, pot aparèixer un vòrtex.

En el segon cas, el flux entre el vehicle i el terra disminueix el *lift* (si és lo suficientment ràpid, pot crear un *lift* negatiu) i redueix el *drag*, també perquè la pressió en el deixant s'incrementa.

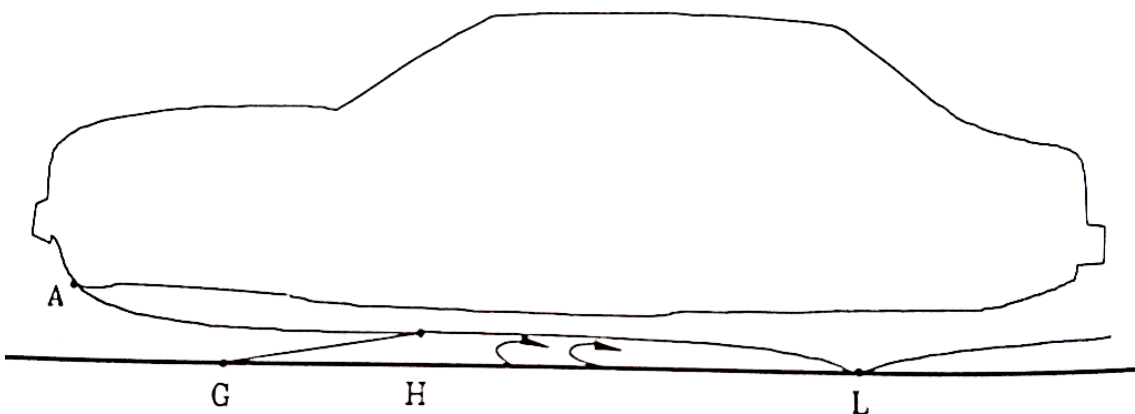


Figura 4.25. Capa límit a la part inferior d'un vehicle

Uns dels factors que fan augmentar el coeficient de resistència a l'avanç són els baixos dels vehicles, ja que són zones molt rugoses que contenen diversos elements com la suspensió, sistema d'escapament o eix de transmissió. Existeixen diverses solucions per evitar aquest problema, com per exemple carenar la zona inferior amb unes làmines de plàstic o metall llises, dissenyar un para-xocs davanter que redueixi la quantitat d'aire que circula per sota el vehicle o col·locar un *spoiler* davanter. A la figura 4.26 es mostra l'evolució que pateix el  $C_d$  a mesura que es van afegint plaques als baixos del vehicle.

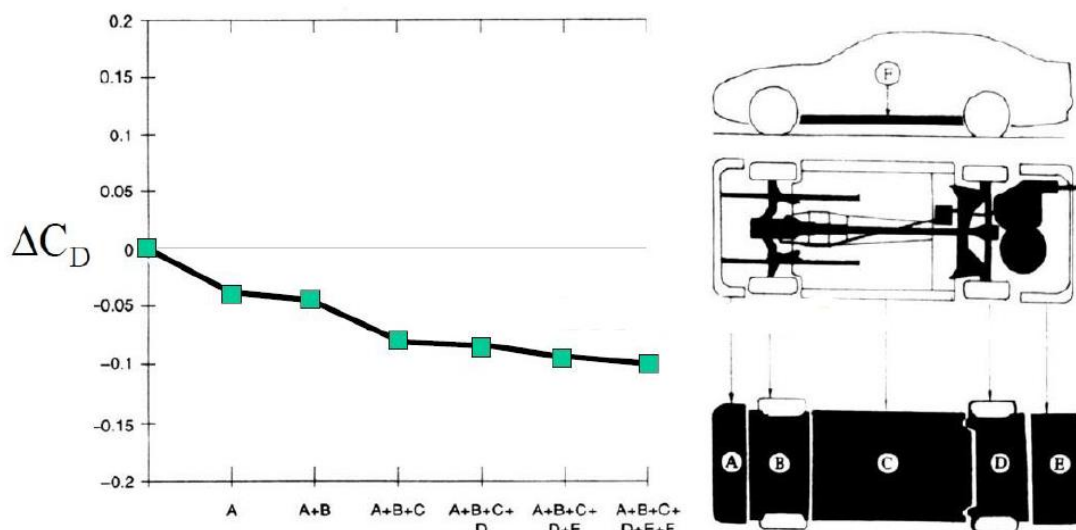


Figura 4.26. Variació del  $C_d$  a mesura que s'afegeixen plaques al vehicle

Per a la millora aerodinàmica d'aquesta part del vehicle, també es pot implementar un difusor. Els difusors són generalment coneguts per la seva importància en els vehicles de competició per la creació de *downforce*, però també tenen un ús beneficiós per l'aerodinàmica dels turismes. Alguns dels beneficis que aporten aquests elements són: la reducció de la resistència a l'avanç i dels vòrtex, i la reducció de la fricció dels baixos del vehicle. D'aquesta manera, s'aconsegueix que el cotxe consumeixi menys combustible, per la reducció del  $C_d$ , i també que la conducció sigui més estable gràcies a la reducció del coeficient de sustentació i la corresponent creació de *downforce*. A la figura 4.27 es mostren varies configuracions de difusors en funció del seu angle i la longitud d'aquest.

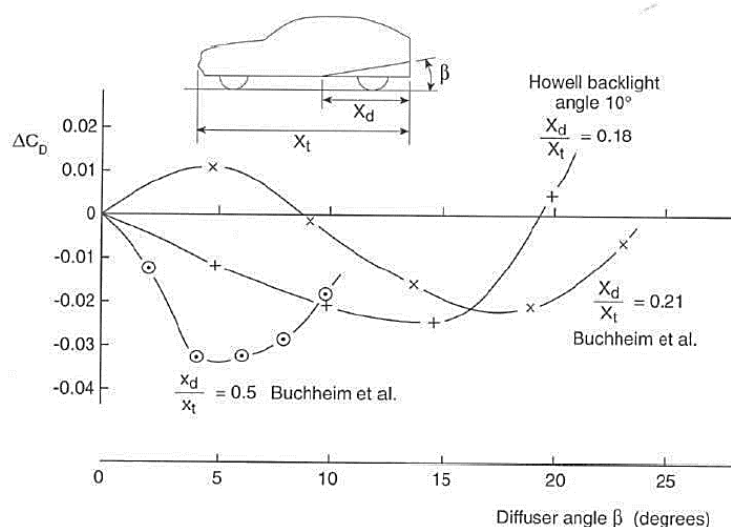


Figura 4.27. Variació del  $C_d$  en funció de l'angle i la longitud del difusor

#### 4.4.7 Rodes

Les rodes d'un vehicle tenen una gran influència en l'aerodinàmica, de fet, aquesta influència pot arribar a un 50% de la resistència a l'avanç. Un dels motius pels quals això passa és que les rodes no estan dissenyades seguint un criteri aerodinàmic. El *drag* resultant d'afegir les rodes a una simulació pot augmentar en més d'un 50% depenent de la protecció que estigui la roda contra el flux.

Una gran quantitat de *drag* es crea a les rodes degut al flux turbulent que recircula per la cavitat entre les rodes i el vehicle. La figura 4.28 (a) mostra el comportament d'aquest flux al voltant d'una roda. Les vores esmolades de la carrosseria del vehicle a la zona inferior introdueix l'aire de manera horitzontal, mentre que l'efecte de la rotació de la roda tendeix a introduir una circulació en vertical. Experiències de recerca mostren que disminuint la distància entre els baixos i la cavitat on estan situades les rodes disminueix la contribució total de *drag*. A la figura XXX (b) es mostra com varia el coeficient de resistència a l'avanç (o  $C_x$ ) i el coeficient de sustentació (o  $C_z$ ) respecte la relació  $h/D$  entre la roda coberta i el seu diàmetre.

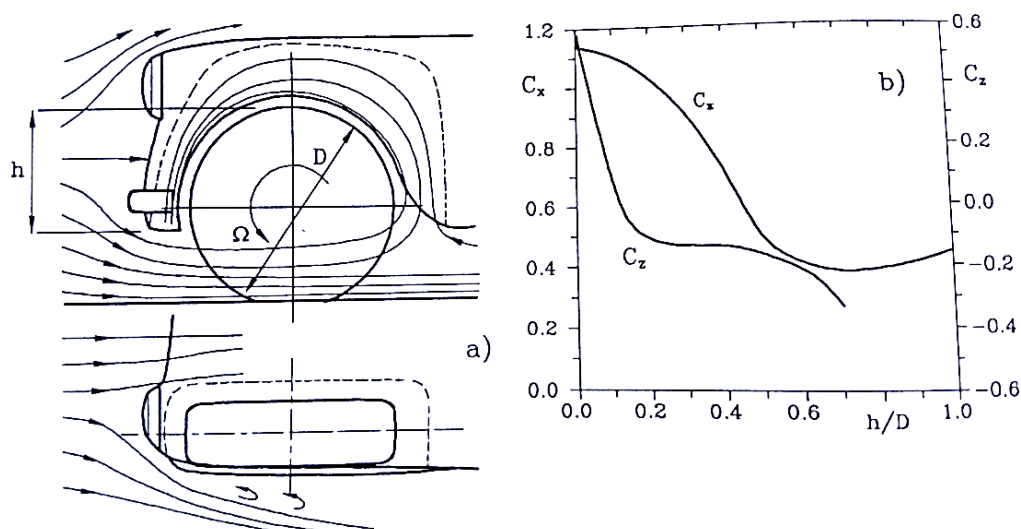
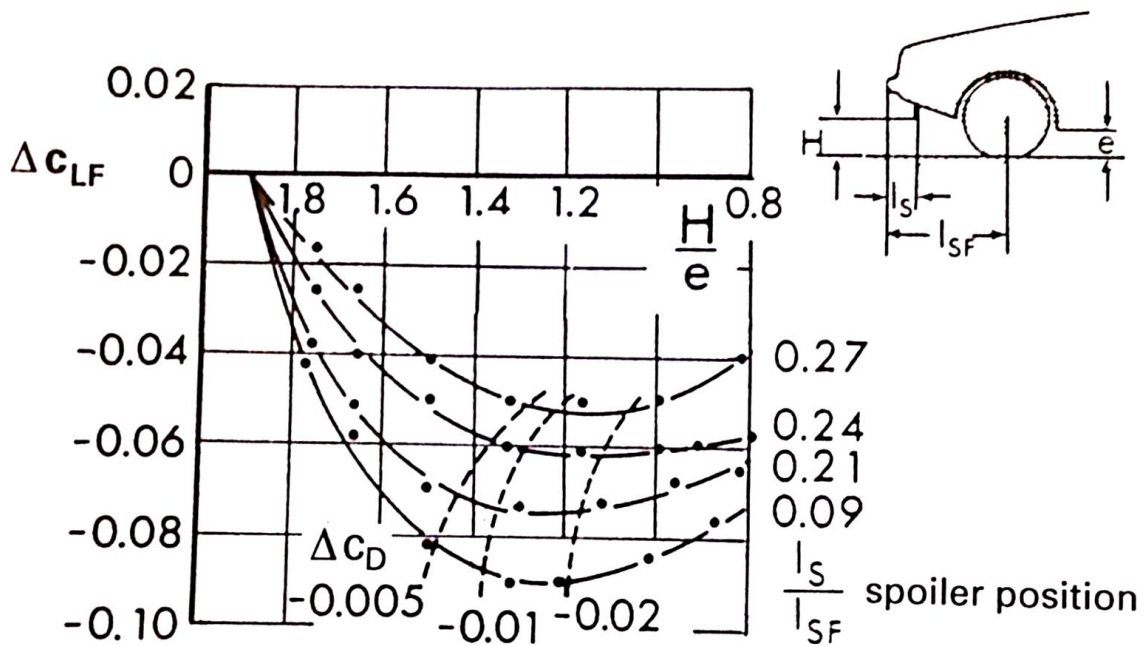


Figura 4.28. Flux al voltant de la roda i variació del  $C_D$  en funció de la roda tapada

#### 4.4.8 Alerons i *spoilers*

Els *spoilers* són modificacions que es basen en millorar la estabilitat del vehicle en les corbes gràcies a la generació del *downforce*. S'utilitza majoritàriament en cotxes esportius i de carreres i n'hi ha de dos tipus: *spoilers* davanters i *spoilers* posteriors.

Els *spoilers* davanters són superfícies aerodinàmiques que s'estenen per la part de sota del para-xocs per bloquejar i redirigir el flux que impacta amb els components dels baixos del vehicle. Mentre que el *spoiler* contribueix al *drag* de pressió, també redueix de manera significativa el *drag* que es crea als baixos. Tot i això, quant més s'augmenta l'altura del *spoiler*, més augmenta el *drag* total del vehicle. Aquest augment del *drag* és negligible en front a la millora de la força de sustentació que disminueix en gran mesura tal i com es mostra a la figura 4.29.


Figura 4.29. Variació del  $C_D$  en funció de la posició del spoiler

Els *spoilers* posteriors se situen a la part superior del vehicle i la seva funció és fer que el flux se separi abans de la superfície del vehicle de manera que el flux a gran velocitat passa a una certa distància. D'aquesta manera, evitem que el flux al darrere del vehicle baixi cap a baix (causant un *lift* no desitjat) i generi bosses d'aire turbulentes i de baixes pressions (contribuint al *drag*). A la figura 4.30 es mostra en un dibuix un esquema del funcionament del *spoiler*. A més a més, quan es crea una zona d'altres pressions a la superfície del maleter, es produeix la generació del *downforce*, tal i com es mostra a la figura 4.31.

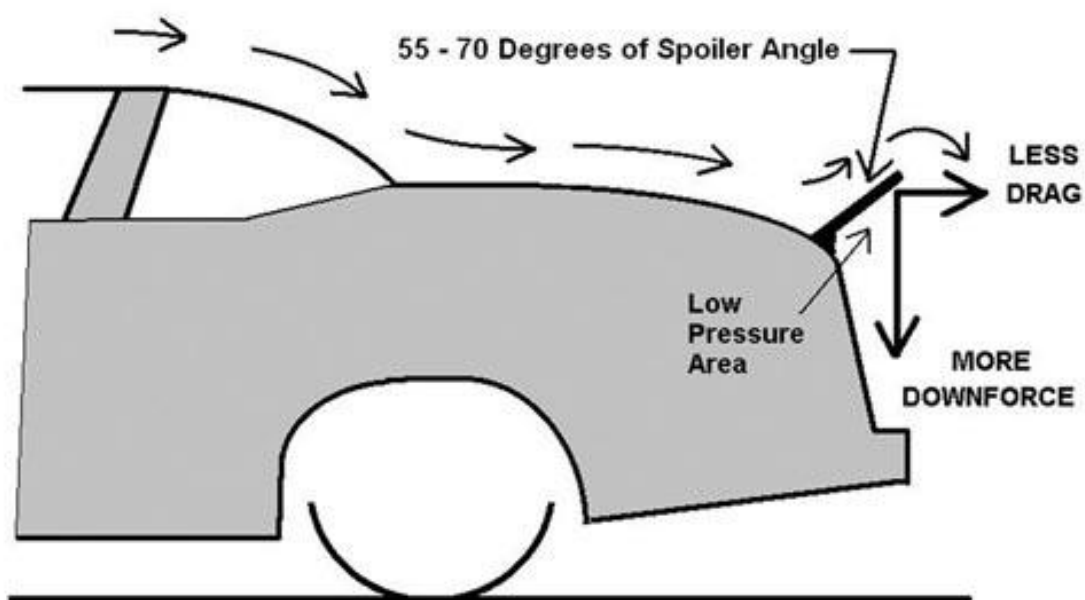


Figura 4.30. Funció del spoiler



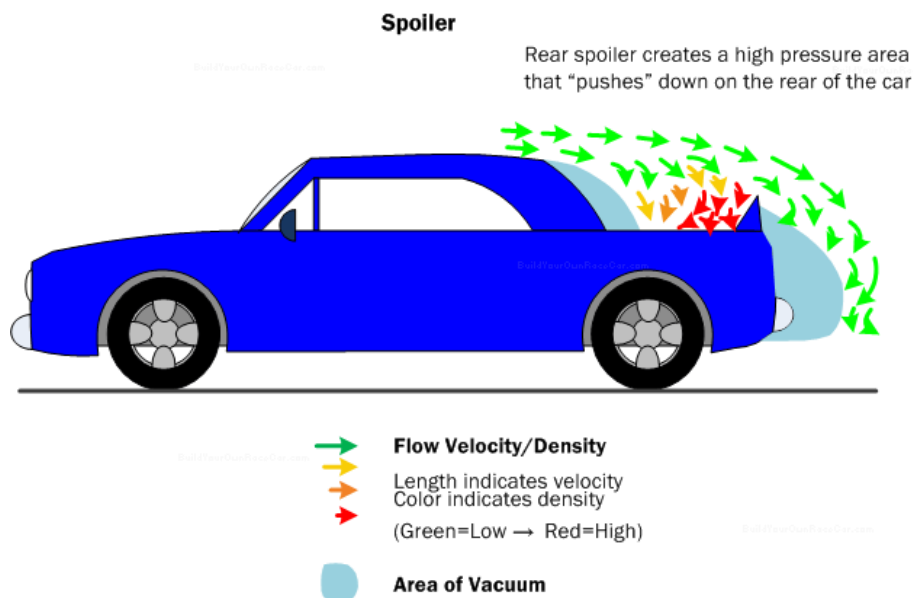
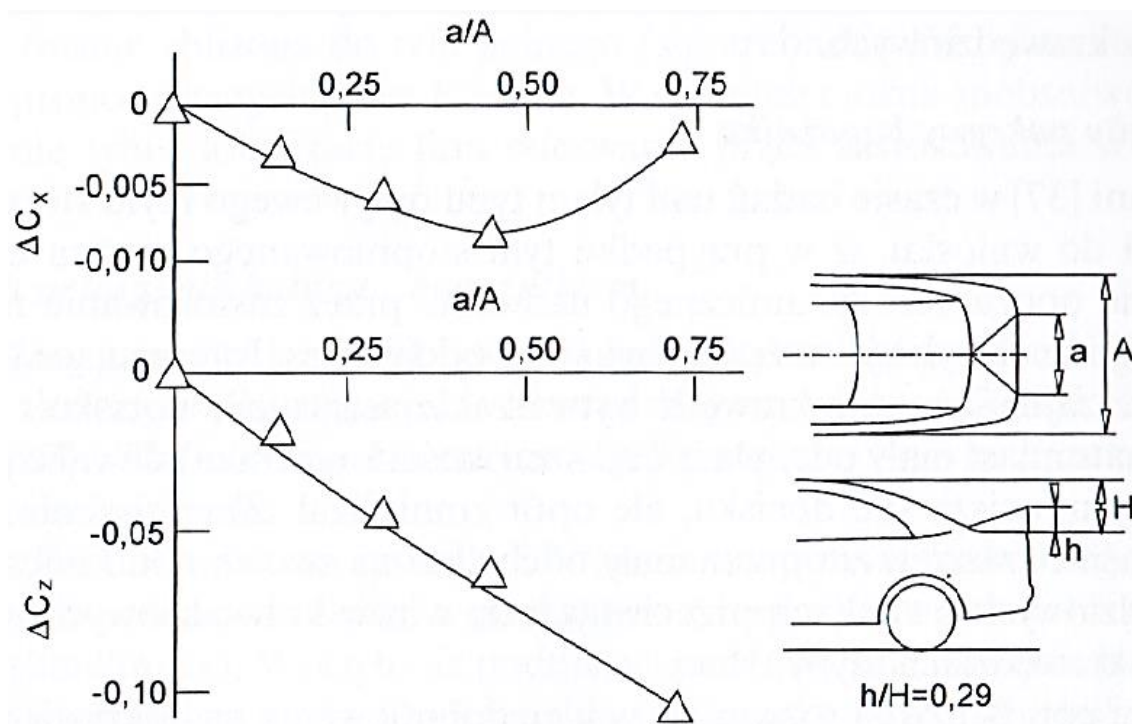


Figura 4.31. Generació de downforce al spoiler

A diferència dels *spoilers*, els alerons s'utilitzen sobretot en cotxes de competició, ja que aquests augmenten el *drag* total, reduint la velocitat màxima i augmentant el consum de gasolina. Però a grans velocitats, els alerons augmenten en gran mesura el *downforce*, augmentant la tracció de les rodes i, finalment, augmentant la velocitat i l'estabilitat.

Els alerons estan formats per un perfil alar invertit situat a una certa altura del maleter del vehicle amb la finalitat de que el flux que passi per sobre de l'aleró tingui una velocitat més ràpida que el que passa per sota. Amb aquest fenomen, el flux que viatja per la part inferior accelera i disminueix la pressió, augmentant d'aquesta manera el *downforce*. A la figura 4.32 es mostra com afecten al *drag* i al *lift* algunes configuracions d'alerons en funció de les relacions d'amplada i de llargada.

Figura 4.32. Variació del  $C_D$  i  $C_L$  en funció de la configuració del aleró

## 5. Dinàmica computacional de fluids

### 5.1 Introducció al CFD

Per a l'estudi d'un flux qualsevol, ja sigui líquid o gas, es modela el fluid mitjançant equacions de Navier-Stokes. Aquestes equacions estan formades per equacions de derivades parcials (EDP) que depenen de la conservació de la massa, l'energia i el moment angular. Amb aquestes equacions podem conèixer el comportament aerodinàmic d'un vehicle, però això suposaria resoldre les EDP en cada punt del volum de control en cada intent de temps. Això suposa un gran problema ja que una simulació d'un vehicle pot arribar a tenir més de 10 milions d'elements. Aquestes quantitats tant altes impliquen una potència i un temps de càlcul necessari tant elevats que no sortiria a compte econòmicament per a ningú interessat en els càlculs aerodinàmics.

En aquest punt és on tenim en conte el mètode CFD. La dinàmica computacional de fluids és la ciència per predir fluxos, transferències de calor, reaccions químiques i fenòmens relacionats amb la resolució d'equacions matemàtiques que governen aquests processos utilitzant processos numèrics. D'aquesta manera, es permet reemplaçar les EDP per resoldre de manera aproximada els càlculs que suposarien recursos excessius d'una forma molt precisa.

Els estudis mitjançant CFD es poden utilitzar en qualsevol etapa del procés de disseny, tant en estudis preliminars, en el desenvolupament del producte o per realitzar nous dissenys del producte. Aquest anàlisi s'acostuma a utilitzar com a complement de resultats experimentals, ja sigui en un laboratori o en un túnel de vent, per reduir l'esforç i el cost necessari per la recollida de informació.

Per a la resolució d'un procés amb CFD, es realitza una discretització del sistema d'estudi en petits volums de control, que acostumen a ser triangulars o quadrangulars, formant el que s'anomena la malla. D'aquesta manera, les equacions generals de la conservació de massa, moment, energia, etc., es discretitzen en equacions algebraïques que són resoltes per simular el flux. Per exemple, en la figura 5.1 es mostren diferents tipus d'elements que poden formar una malla.

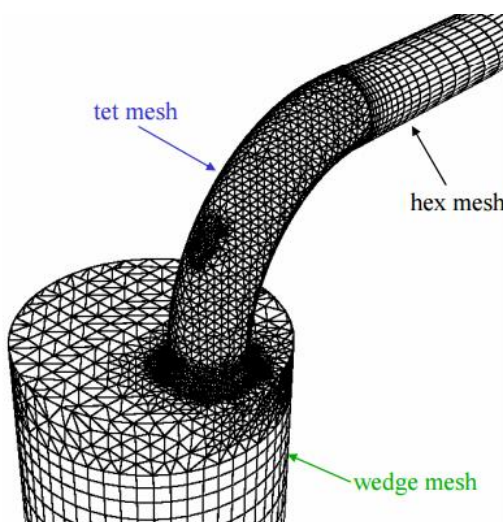


Figura 5.1. Malla en una geometria



Els anàlisis realitzats amb CFD estan formats per tres etapes: pre-procés, solució i post-procés. A la primera etapa, el pre-procés, és on es defineix el volum de control i la malla d'elements finits. A més a més, també es creen les zones on es vol fer un refinament de la malla amb elements més petits per a captar amb més detall el comportament del flux en aquelles zones. Finalment, s'han d'aplicar les condicions de contorn en el domini d'estudi. A l'etapa de la solució, s'han de definir de quina manera calcularà el programa i totes les variables que pot tenir el model i el flux.

Un flux es pot classificar de moltes maneres, entre elles:

- Laminar vs. turbulent:
  - Laminar: les partícules de flux es mouen de manera suau, sense grans barreges de fluid.
  - Turbulent: les partícules de flux es mouen caòticament, amb significants barreges de fluid.
- Compressibles vs. incompressibles:
  - Incompressibles: el volum de fluid no canvia. Implica densitat constant.
  - Compressible: El volum d'una partícula de fluid pot variar depenent de la posició. Implica canvi de densitat. Aquests també son classificables amb el nombre de Mach ( $M$ ). On, si  $M > 1$  és supersònic i si  $M < 1$  subsònic.
- Newtonià vs. no-Newtonià.
- Extern vs. intern.

Per al càlcul de una simulació de CFD, es poden utilitzar diferents mètodes de càlcul. Aquests són:

- *First-order upwind*: aquest és el més senzill i fàcil de convergir, però molt difús. Per aquesta raó, és un model que s'utilitza per iniciar les primeres iteracions.
- *Power-law*.
- *Second-order upwind*.
- *QUICK*.

Com a últim model que s'ha de definir per al càlcul de la solució és el model de turbulència. Aquests models estan basats en les equacions de Navier-Stokes, i són:

- Model d'una equació: Spalart-Almaras.
- Models de dos equacions:  $k$ - $\epsilon$  (Standard, RNG, Realizable),  $k$ - $\omega$  i ASM.
- Model de set equacions: model de tensions de Reynolds.

En general, si un flux és simple, es recomana començar a iterar amb 100 iteracions amb un model Standard  $k$ - $\epsilon$  i *First Order Upwind*. Finalment, s'acaba convergint la solució amb el model *Second Order Upwind*. Si el flux conté separacions o remolins, es recomana convergir la solució amb el model Realizable  $k$ - $\epsilon$ . En el cas d'una simulació que estigui dominada per fluxos amb remolins s'utilitza el model RSM. Els altres models són més complicats d'utilitzar i s'utilitzen especialment per casos específics.

En aquesta etapa es basa en un procés iteratiu que es repeteix fins que s'arriba al límit de iteracions definit per l'usuari o fins que el canvi d'una variable entre dos iteracions consecutives arriba a un valor molt petit. Arribats en aquest punt, es pot considerar que la solució ha convergit.

En el cas del programa utilitzat en aquest projecte per al càlcul numèric, FLUENT®, aquests valors de convergència es poden monitoritzar gràficament tal i com es mostra a la figura 5.2.

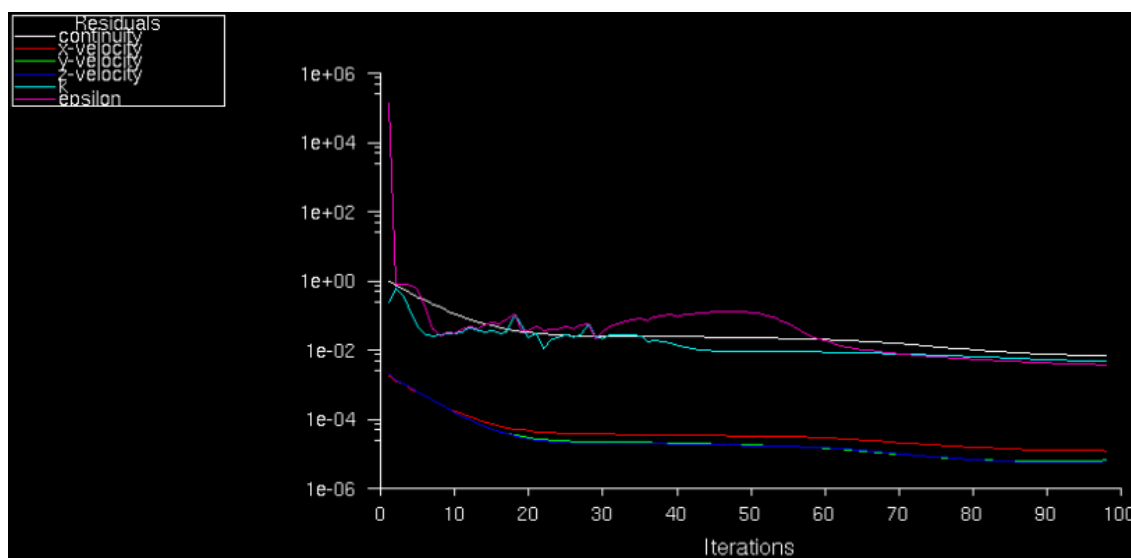


Figura 5.2. Monitorització dels residus d'una simulació

Per últim, en el post-procés s'analitzen els resultats obtinguts en l'etapa de solució gratificant diferents propietats del fluid, com per exemple la velocitat o la pressió. En aquesta etapa és on s'ha de comparar els resultats obtinguts amb la realitat i, d'aquesta manera, validar el model.

## 5.2 Creació del model

En aquest projecte, el vehicle que s'estudiarà és el Fiat 128 de l'any 1969.

Per la creació del model s'ha utilitzat el programa de CAD SOLIDWORKS 2015® publicat per la empresa *Dassault Systèmes* ja que és el programa que s'ha ensenyat al Grau d'Enginyeria Industrial.

Degut al secretisme que existeix en les diferents marques del sector de la automoció, obtenir les mesures exactes per reproduir un model idèntic a la realitat es una feina impossible. Per aquesta raó, s'ha optat per partir de unes mides reals que s'han trobat per internet i, a totes les altres parts, s'ha fet una aproximació de les mides a ull comparant el resultat amb imatges del automòbil real. Aquesta imatge es mostra a la figura 5.3.

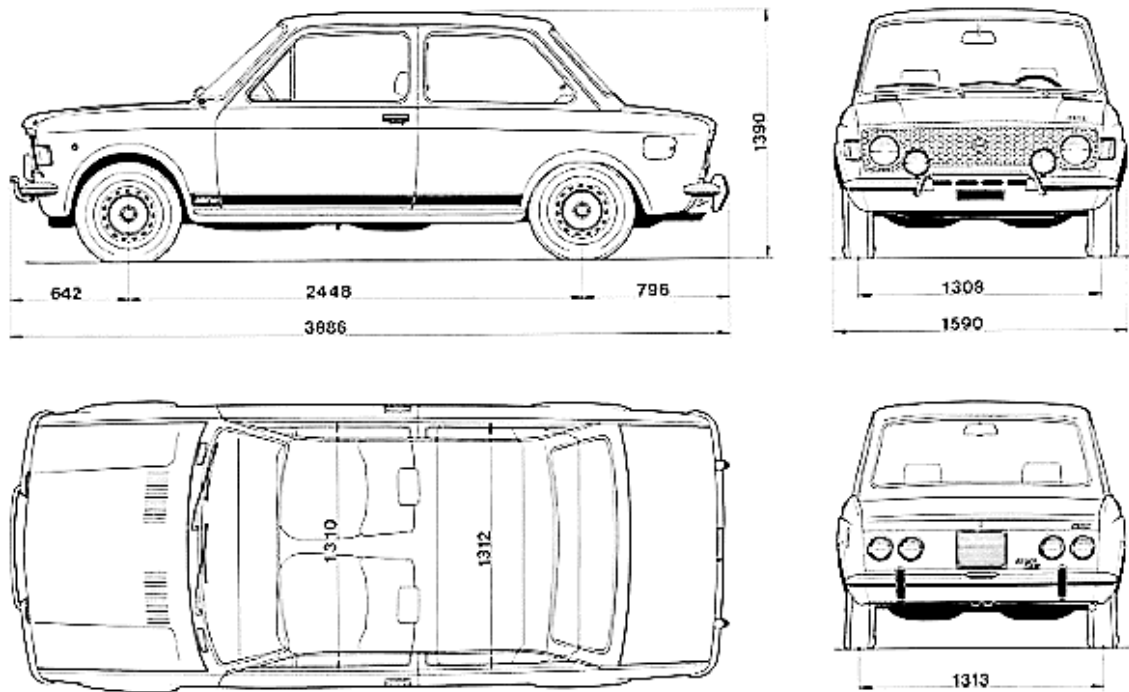


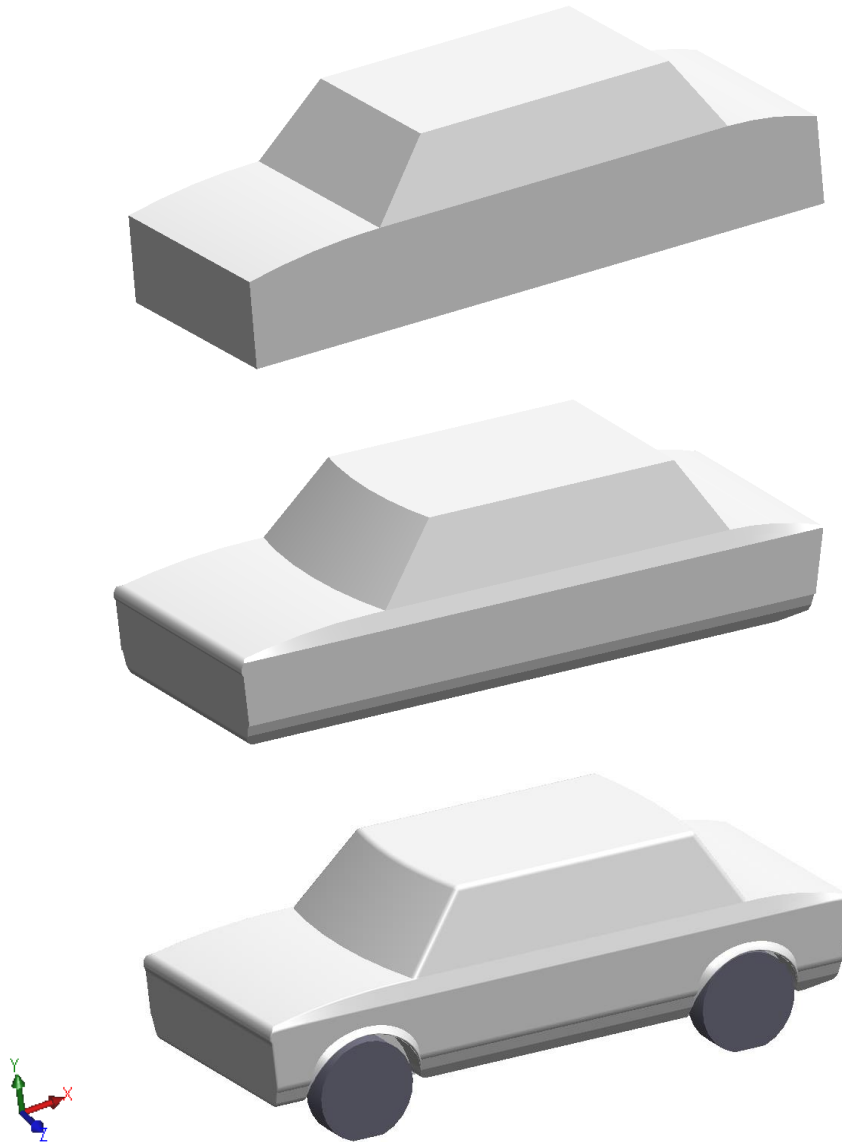
Figura 5.3. Dimensions del Fiat 128

Per a la creació del model amb el programa de CAD, s'ha començat extruint i recobrint unes superfícies a partir de les quals s'ha començat a treballar i a afegir els detalls característics del vehicle d'estudi tal i com mostra la figura 5.4. Per la realització del disseny, s'han utilitzat les operacions de SOLIDWORKS:

- Extrudir x6
- Recobrir x7
- Tallar-extrudir x7
- Tallar-revolució x2
- Arrodoniment x19
- Simetria x4

I les geometries:

- Croquis x33
- Croquis 3D x11
- Plans x13



*Figura 5.4. Etapes de la creació del model*

Per acabar, es fa una última simetria que partirà per la meitat el vehicle per l'eix X-Y. La raó d'aquesta simetria és perquè la posterior simulació amb CFD només s'utilitzarà la meitat del model. D'aquesta manera, es necessitaran la meitat d'elements finits al fer la malla i, per tant, la meitat de temps en fer el càlcul. Cal comentar que, per temes de compatibilitat entre softwares, s'ha hagut de exportar el model en format IGS per poder-lo llegir en el FLUENT.

### 5.3 Creació de la malla

La creació de la malla és el següent pas després de la creació del model. El mallat és una de les parts més importants per obtenir una solució bona i fiable. La mesura dels elements finits i la seva quantitat és el que determina el temps i la potència de càlcul necessària per arribar a la solució. El nombre d'elements de la malla i el temps de càlcul és directament proporcional, mentre que la mesura i el temps és inversament

proporcional. És a dir, que quant més elements hi hagi i més petits siguin, més precisa serà la solució, però pagant el preu d'un gran temps per al càlcul. De forma oposada, una mida d'element gran amb menys quantitat dóna un resultat menys precisa, però obtinguda amb menor temps. L'elecció de la mida i la quantitat d'elements és una feina que depèn de diferents factors, ja que quan es duu a terme un projecte el que interessa és trobar uns resultats el més aviat possible per reduir costos innecessaris.

Per aquesta raó, una de les simplificacions que es fan en el model per reduir el temps de càlcul i que no afecten al resultat de la simulació, és simular el flux a través de la meitat del vehicle. Una altra simplificació que s'ha aplicat és la de tallar les rodes a 15mm del terra. Ja que el programa FLUENT presenta problemes amb les zones on l'objecte d'estudi és tangent a una altra superfície del volum de control, com, per exemple, en el contacte entre les rodes i la carretera. Amb aquest tall a les rodes, aconseguim que aquesta zona de contacte passi de ser una línia a una superfície paral·lela al terra.

A continuació, es defineix el volum de control en el que s'estudiarà el comportament aerodinàmic del vehicle. Aquest volum representa els assaig en un túnel de vent, i té unes mesures que permetin captar l'efecte de les turbulències en la part posterior del vehicle de forma precisa. A més a més, hi ha d'haver una distància entre la part del davant del vehicle per representar el flux d'aire que impacta contra el morro.

Les mesures dels volums de control per a un estudi aerodinàmic, varien en funció de l'enginyer consultat i del que es vol estudiar. En el nostre cas, ens interessa estudiar les forces i moments aerodinàmics, juntament amb les velocitats i les pressions al voltant del vehicle; així que amb una distància a la part davantera (tant d'altura com de amplada) d'entre un i dos vehicles és més que suficient. Per la part posterior, com tampoc no ens interessa estudiar els efectes a gran distància del vehicle, és suficient deixar una distància de tres vegades la longitud del model.

Pel nostre model en particular, s'ha utilitzat unes distàncies de 4m per la part frontal, 4m d'altura, 4m d'amplada i 11m de llargada en la part posterior; quedant el volum de control tal i com es mostra a la figura 5.5.

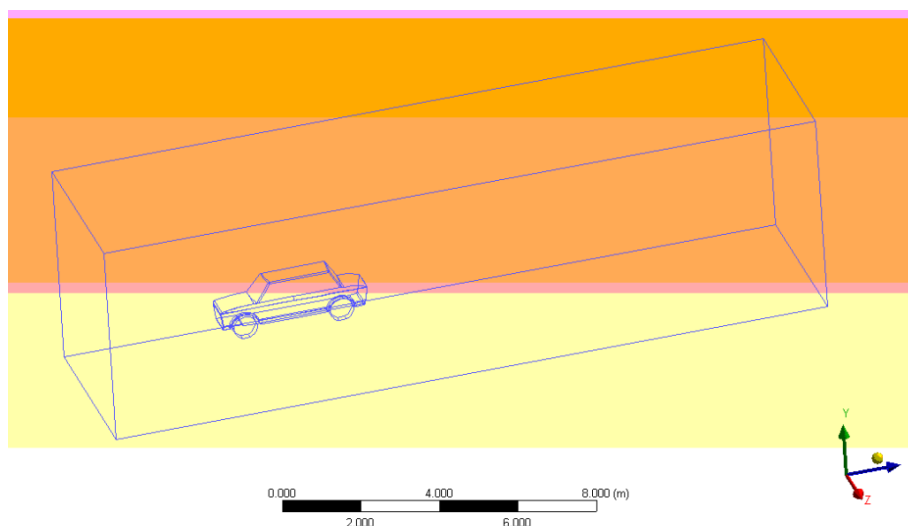


Figura 5.5. Volum de control

A més a més d'aquest volum de control, amb la finalitat de optimitzar el temps de càlcul sense baixar precisió als resultats, s'han afegit dos volums més que serviran per crear regions amb un refinament de la malla més petit. Aquestes regions són on ens interessa calcular amb més precisió, ja que són les parts que més influeixen al flux.

El primer volum envolta el cotxe a una distància de 1m i s'allarga per la part posterior fins a una distància d'un cotxe (4 metres). D'aquesta manera, podrem estudiar amb més exactitud el comportament del flux i dels remolins que es creen en aquella zona.

El segon volum de control, està situat a la part inferior del vehicle, ocupa justament l'espai entre la carretera i els baixos del cotxe. En aquest volum els elements són encara més petits que l'anterior volum perquè el flux per aquesta zona té un efecte important a les turbulències creades a la part posterior del cotxe i un valor acurat en aquesta zona proporciona més fiabilitat al càlcul dels coeficients aerodinàmics i a les conclusions extretes. En la figura 5.6 es mostren aquests dos volums de control de refinament.

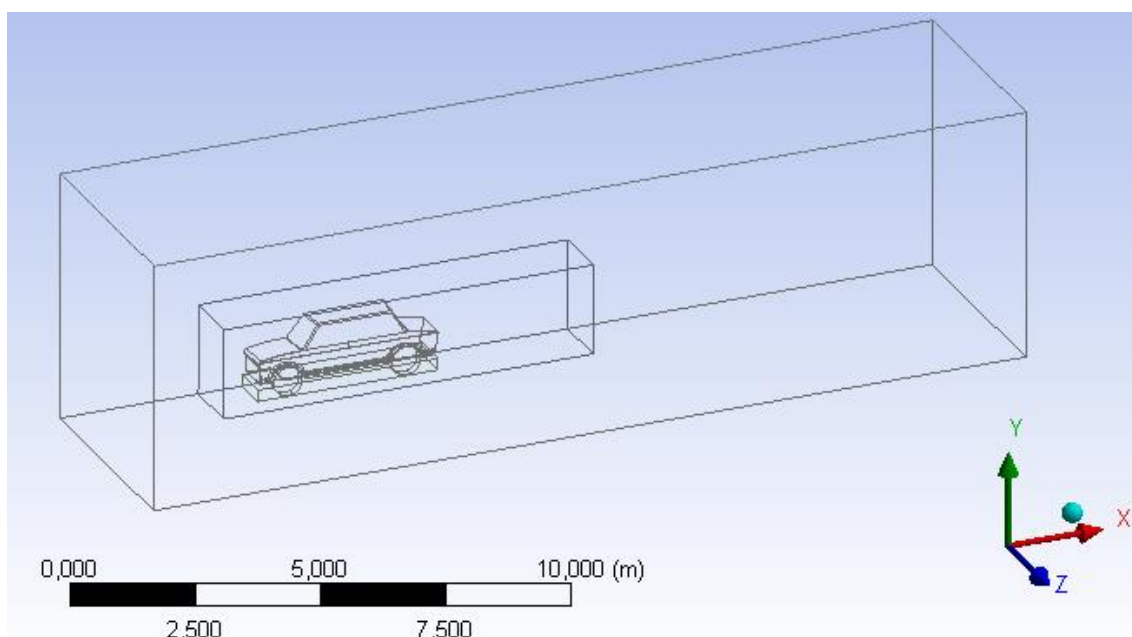


Figura 5.6. Volum de control i zones de refinament

El tipus d'elements finits escollits per a la simulació són tetraèdrics amb una longitud mínima de 5 mm i una longitud màxima de 250 mm. Les mides dels elements utilitzats per als volums de control i la superfície del vehicle es mostra a la taula 5.1.

	ELEMENT MÍNIM	ELEMENT MÀXIM
COTXE	5mm	50mm
VOLUM CONTROL: VEHICLE	5mm	35mm
VOLUM CONTROL: TERRA	5mm	15mm

Taula 5.1. Mida dels elements als volums de control



Amb aquesta configuració de mallat, la malla del vehicle quedaria com es pot observar a la figura 5.7.

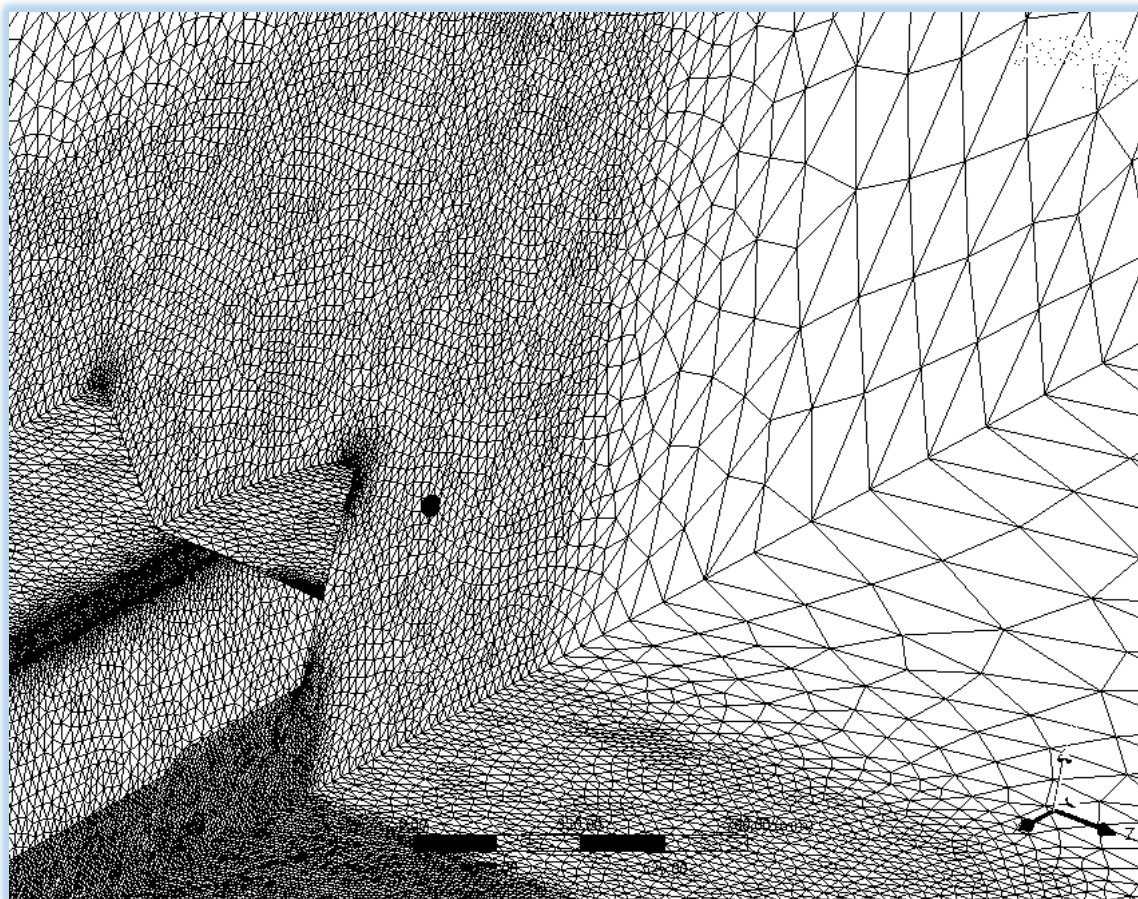


Figura 5.7. Mallat

Finalment, la malla propera a les superfícies del model on contacta el flux (vehicle i carretera) ha de ser lo suficientment fina com per resoldre correctament el fenomen de la capa límit i els efectes viscosos que es generen. Amb aquesta finalitat, s'han col·locat cinc capes d'elements hexaèdrics ja que aquest tipus d'elements donen solucions més precises per aquests fenòmens. Per tal de fer una transició suau entre els elements que formen la capa límit i la resta de la malla d'elements tetraèdrics, s'ha fet que cada element sigui un 20% superior al anterior, tal i com mostra la figura 5.8 i la figura 5.9.

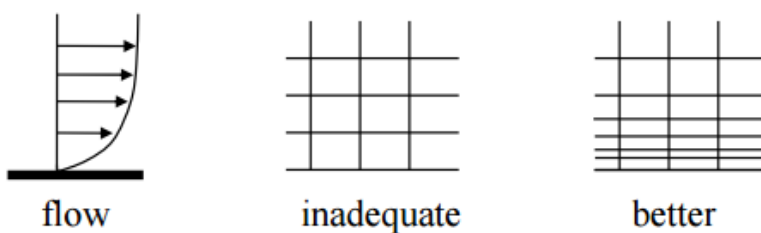


Figura 5.8. Mallat adequat per la capa límit

Un cop definits totes les característiques de la malla s'ha obtingut una simulació amb 7.668.269 elements i 1.683.994 nodes. L'aspecte general de la malla es pot veure a la figura 5.10.

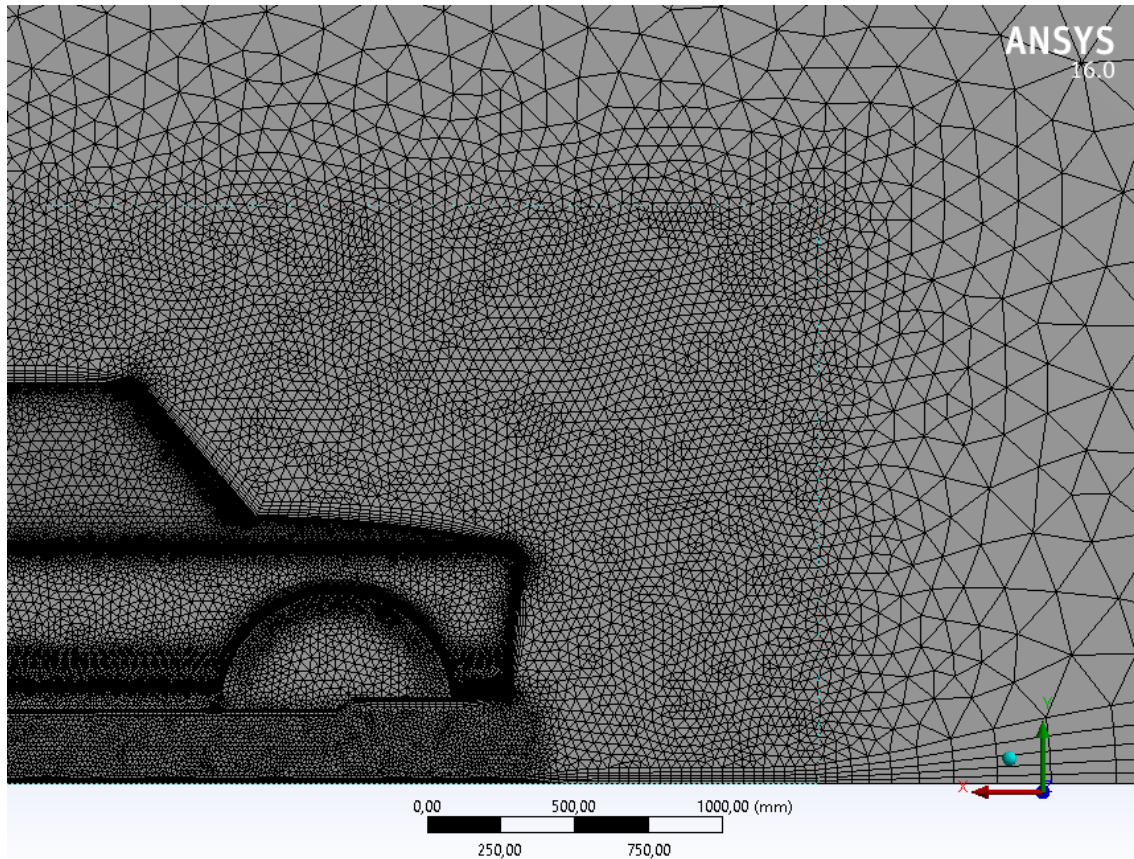


Figura 5.9. Mallat per detectar la capa límit

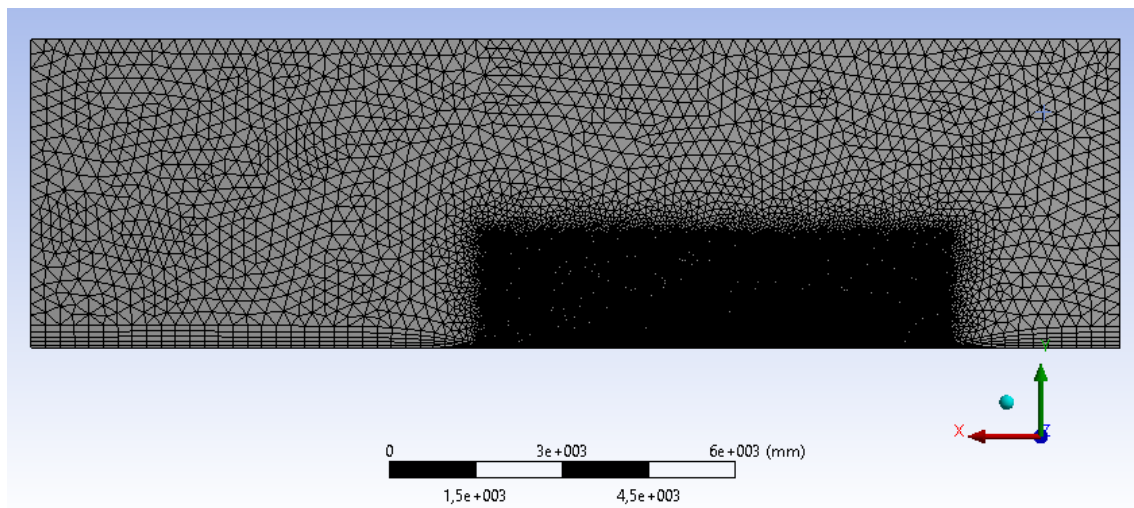


Figura 5.10. Mallat de tot el volum de control

#### 5.4 Condicions de contorn

El programa FLUENT necessita que les superfícies del volum de control estiguin anomenades per, més endavant, aplicar les condicions de contorn a cadascuna. En aquestes simulacions, la superfície per on entra el flux d'aire s'ha anomenat *velocity-inlet* i la de sortida *pressure-outlet*, ja que el programa demana que es defineixi una entrada i una sortida.



Aquestes superfícies s'anomenen d'aquesta manera perquè FLUENT reconeix automàticament quin tipus de condició de contorn aplicar i en un futur només haurem de definir la magnitud de la velocitat i la pressió. La superfície que representa la carretera s'anomena *road* i la del model a estudiar *car*. Per últim, la resta de superfícies es defineixen com a superfícies de simetria, sent anomenades com *symmetry*, *symmetry-side* i *symmetry-top*.

A continuació s'exposen totes les condicions de contorn aplicades al model i la zona que són aplicades:

- *Velocity-inlet*. Per aquesta zona és on entrarà el flux d'aire a una velocitat de 33.33m/s (120km/h) ja que és la velocitat màxima que es permet circular per les carreteres del nostre país. A més a més, s'aplica una intensitat de turbulència del 1% ja que és una zona de flux lliure.
- *Pressure-outlet*. Per aquesta zona sortirà el flux d'aire un cop ha passat tot el volum de control. Aquesta zona es defineix una pressió de referència de 0 Pa, ja que s'ha de definir un valor relatiu de la pressió i la simulació es realitzarà a una pressió absoluta igual a la pressió atmosfèrica. Degut que aquesta superfície es veu afectada per les turbulències del vehicle, s'aplica una intensitat de turbulència del 5%.
- *Car i Road*. Les superfícies del cotxe i la carretera (respectivament) es defineixen com parets les quals l'efecte viscos del flux d'aire es té en compte. D'aquesta manera, la velocitat tangencial de fluid en la superfície és igual a zero i es produeix l'efecte de la capa límit. Per millorar l'estudi i fer-lo més realista, es podria aplicar a les rodes una condició de paret rotativa, però finalment no s'ha aplicat aquesta condició ja que, en aquest estudi, les rodes del vehicle estan tallades per la part inferior i complicaria en excés el càlcul per a una petita millora en la precisió del càlcul.
- *Symmetry*. La resta de superfícies (*symmetry*, *symmetry-top* i *symmetry-side*) se'ls ha aplicat la condició de contorn de simetria ja que aquestes no fan ninguna acció en el càlcul del flux. Interiorment en el programa, aquesta condició fa que els efectes viscosos del flux no s'apliquin i les forces normals en les superfícies siguin zero.

## 5.5 Configuració de la solució

El primer pas per configurar la solució és conèixer amb quin tipus de flux estem treballant. Un cop decidida la velocitat de treball, es pot calcular el nombre de Mach per saber si es tracta de un flux compressible o incompressible. Aquest nombre relaciona la velocitat del fluid (U) amb la velocitat del so (a) en aquest flux.

$$Ma = \frac{U}{a} = \frac{33.33 \frac{m}{s}}{343 \frac{m}{s}} = 0.09717$$

Degut que el nombre de Mach és menor que 0.3, el flux es considera incompressible i, en definitiva, els càlculs realitzats per l'ordinador queden molt simplificats.

El model de turbulència utilitzat en aquest estudi ha estat el  $k$ - $\epsilon$  ja que aquest model és el més utilitzat en les simulacions CFD per simular fluxos turbulents. Els avantatges d'aquest model són que és relativament simple d'implementar i porta a estats estables que convergeixen relativament fàcil. A tot això, s'ha d'afegir que té unes prediccions raonables per una gran varietat de fluxos i, entre ells, el d'un túnel de vent. D'altra banda, també existeixen alguns desavantatges a la utilització d'aquest model com, per exemple, prediccions pobres per fluxos rotacionals, amb grans separacions de capa límit, i només és vàlid per fluxos completament turbulents.

Aquest model consta de dos equacions que representen les condicions turbulentes del flux. La primera variable és la de l'*Energia cinètica turbulenta* o  $k$ , i és la que determina la energia a la turbulència. La segona variable és la *Dissipació turbulenta* o  $\epsilon$ , i determina el rati de dissipació d'energia cinètica turbulenta. A la figura 5.11 es mostren les equacions simplifiades de  $k$  i  $\epsilon$  respectivament.

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}}_{\text{Rate of increase}} + \underbrace{\text{div}(\rho k \mathbf{U})}_{\text{Convective transport}} = \underbrace{\text{div}\left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k\right]}_{\text{Diffusive transport}} + \underbrace{2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij}}_{\text{Rate of production}} - \underbrace{\rho \epsilon}_{\text{Rate of destruction}}$$

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t}}_{\text{Rate of increase}} + \underbrace{\text{div}(\rho \epsilon \mathbf{U})}_{\text{Convective transport}} = \underbrace{\text{div}\left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \text{grad } \epsilon\right]}_{\text{Diffusive transport}} + \underbrace{C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij}}_{\text{Rate of production}} - \underbrace{C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}}_{\text{Rate of destruction}}$$

Figura 5.11. Equacions del model  $k$ - $\epsilon$

Degut que aquest model té algunes separacions de capa límit i algunes superfícies corbades, es podrien donar alguns problemes de convergència. Per evitar això, s'ha escollit l'opció *realizable*. Les aplicacions industrials proven que és possible aconseguir bons resultats en coeficients de resistència a l'avanç amb un error relatiu entre un 2% i un 5%, a més a més, aquesta opció fa que el model sigui més estable i convergeixi més ràpidament.

També s'ha seleccionat la opció *Non-equilibrium Wall Function* o funció de no equilibri a la paret, dins el model  $k-\epsilon$ . Aquesta opció permet obtenir una predicció del comportament de la capa límit turbulenta (incloent la separació) sense necessitar un augment significatiu del temps ni la potència de càlcul necessària.

Per facilitar la convergència de la solució, s'han utilitzat les opcions de *First Order Upwind* per l'equació del moment, l'energia cinètica turbulenta i el rati de dissipació turbulenta a les primeres 100 iteracions. D'aquesta manera, s'obté un resultat no del tot real però bastant aproximat i amb l'avantatge que convergeix molt fàcilment. Des de la iteració 101 fins la 600, s'ha canviat la opció a *Second Order Upwind* ja que aquesta opció és més precisa que la primera però té el problema, ja solucionat, que li costa convergir si s'utilitza des del principi. El canvi entre la opció *First Order Upwind* i *Second Order Upwind* es pot observar als gràfics dels residus, el coeficient de resistència a l'avanç, el coeficient de sustentació i el coeficient del moment de capcineig, on s'observa un canvi brusc de la corba. Aquests gràfics corresponen a la figura 5.12, la figura 5.13, la figura 5.14 i la figura 5.15 respectivament.

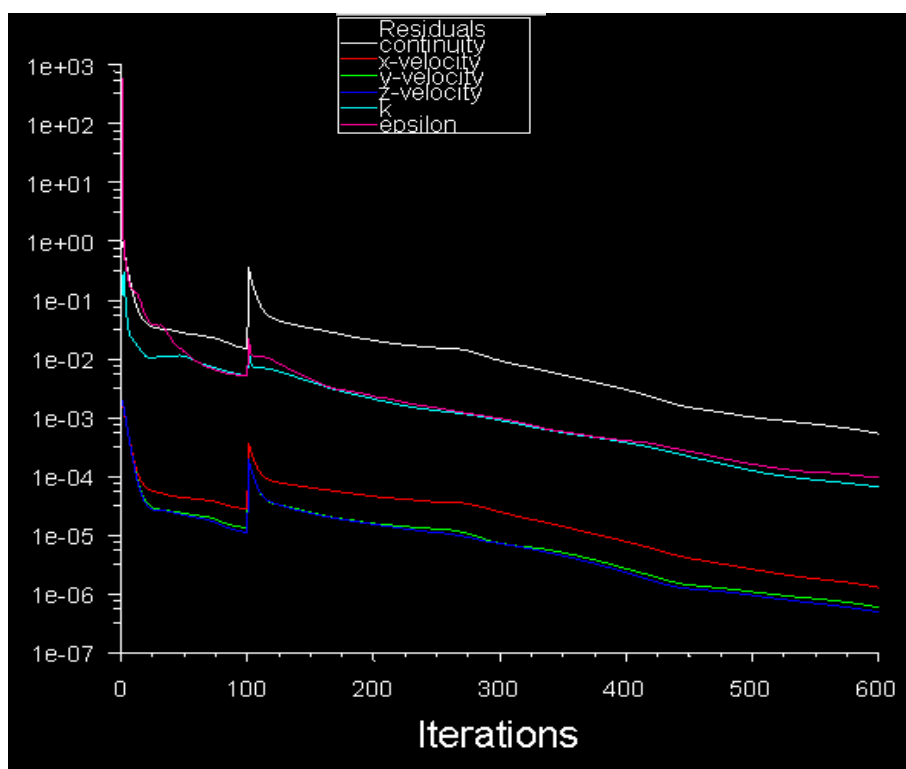


Figura 5.12. Monitorització dels residus

Un altre indicador per saber si la solució ha convergit, és constant i no oscil·la sobre cap valor, és observar el gràfic de la monitorització del  $C_D$ ,  $C_L$  i  $C_M$ . És pot dir que és un resultat correcte si en les últimes iteracions el valor és estable i no oscil·lant, tal i com es pot veure en les figures 5.13, 5.14 i 5.15.

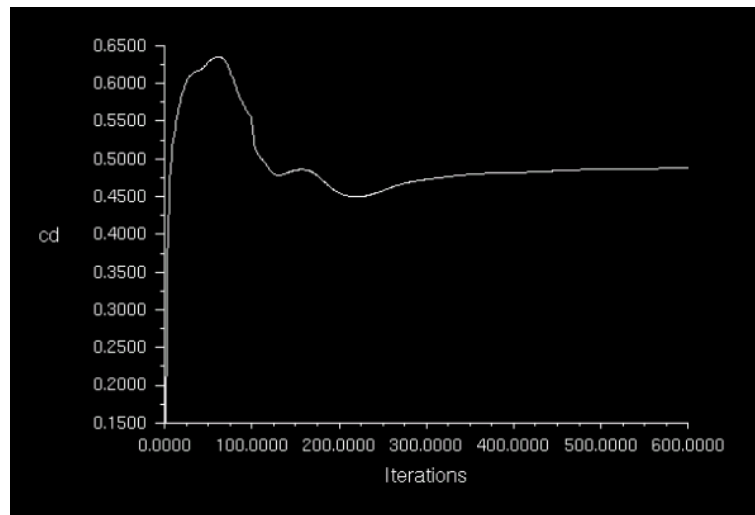


Figura 5.13. Coeficient de resistència al avanç

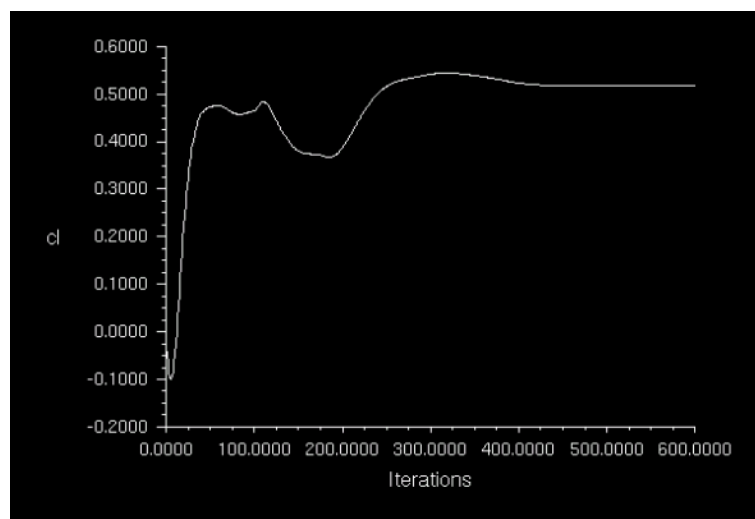


Figura 5.14. Coeficient de sustentació

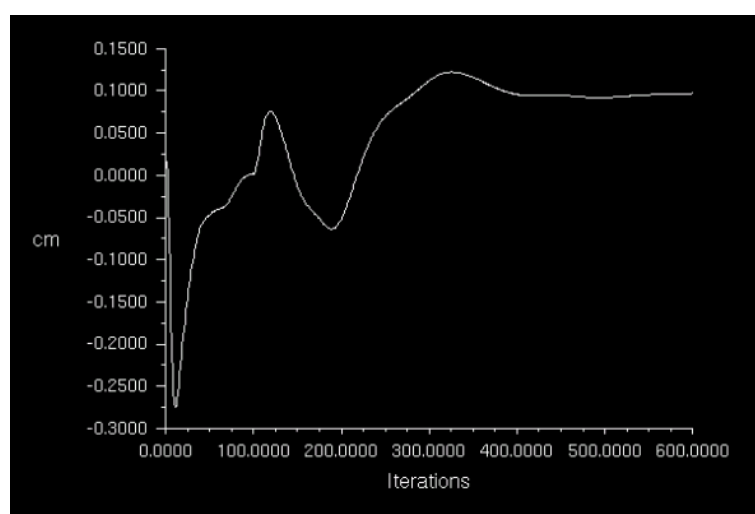


Figura 5.15. Coeficient del moment de capcineig

Amb aquesta configuració, el programa ha necessitat 600 iteracions i unes 16h de càlcul per arribar a la solució.

## 6. Anàlisis de resultats

Quan es tracta d'analitzar una simulació de CFD, el primer que es calcula són les forces i els moments que actuen sobre el vehicle, així com els coeficients aerodinàmics per poder valorar el rendiment aerodinàmic del model. Seguidament, també és molt útil representar les línies de flux d'aire al voltant del vehicle per entendre quin és el comportament de la capa límit, on se separa i en quines zones es creen vòrtex. Quan es localitzen aquestes zones, és més fàcil saber quines parts del vehicle podrien ser millorades per tal d'optimitzar el model.

L'eficiència, que es defineix com la relació entre el  $C_L$  i el  $C_D$ , també es calcularà amb la finalitat d'obtenir un altre indicador per valorar els resultats. Aquest indicador s'utilitza professionalment per valorar la qualitat dels perfils alars en el món de l'aeronàutica en empreses com NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*) o GOE (*Göttingen*), però també pot servir per estudiar el comportament general d'un vehicle.

Degut que al dissenyar un model el que es busca es arribar a uns valors de  $C_D$  el més baixos possibles per reduir el consum, el que es busca realment és obtenir una eficiència aerodinàmica el més alta possible. Si l'eficiència és alta no podem afirmar de manera segura que el *drag* hagi disminuït, ja que podria ser que el *drag* hagués augmentat i el *lift* també amb un valor més gran. Per tant, no serveix estudiar un d'aquests valors per separat, sinó que s'han d'estudiar en conjunt per veure realment la qualitat del disseny del model.

A la taula 6.1 es mostren la recopilació dels valors numèrics obtinguts de la simulació, tal com el coeficient de resistència a l'avanç, el coeficient de sustentació, l'eficiència aerodinàmica, el coeficient del moment de capcineig i les forces i moments totals aplicats al centre de pressió. Per nombrar les diferents magnituds, s'ha utilitzat la seva equivalència en anglès, ja que és més breu i és la que s'utilitza en el món de l'aerodinàmica.

Finalment, els resultats expressats a la taula 6.1 s'han dividit en tres components, ja que les forces que rep el vehicle es divideixen en un força deguda a l'esforç tallant o fricció, degut a la component de les forces viscoses; i l'efecte de la diferència de pressió entre la part frontal i posterior del model que frena el vehicle. La tercera component és la suma de les dos anteriors, i és la que finalment s'ha d'analitzar per calcular les forces reals que rep el vehicle.

Per últim, s'ha calculat la velocitat del flux a l'estela del vehicle, concretament a un punt a pocs mil·límetres del maleter del cotxe, i s'ha anomenat *wake-velocity*.

El programa de simulació ha utilitzat una àrea de referència per al càlcul de les forces i moments de  $0.816411\text{m}^2$  i una densitat de  $1.225\text{kg/m}^3$  per al càlcul dels coeficients.

MAGNITUD	EFFECTE PRESSIÓ	EFFECTE VISCÓS	TOTAL
$C_D$	0.459	0.029	0.488
$C_L$	0.518	0.001	0.519
$C_L/C_D$	-	-	1.064
$C_M$	0.098	-0.001	0.097
DRAG	254.81 N	16.12 N	270.93 N
LIFT	287.57 N	0.39 N	287.96 N
PITCHING MOMENT	54.59 Nm	0.65 Nm	55.93 Nm
WAKE VELOCITY	-	-	4.2 m/s

Taula 6.1. Resultats de la simulació

Coneixent els resultats dels coeficients calculats mitjançant *FLUENT®* és possible calcular els valors de les forces i els moments amb l'ús de la mecànica clàssica. Sabent que les forces i moments s'apliquen en el centre de pressions i que aquest i el centre de gravetat són coneguts, es pot aplicar el Teorema del Moment Cinètic en el centre de gravetat i el resultat hauria de ser semblant al moment de capcineig calculat pel programa.

Gràcies al mateix programa de la creació del CAD, *SOLIDWORKS®*, és possible calcular el centre de gravetat i gràcies al programa *FLUENT®* és possible calcular el centre de pressions i les seves coordenades expressades en metres. Aquests dos punts juntament amb el sistema de coordenades i les forces aplicades es mostra a la figura 6.1, on el centre de gravetat i de pressions són respectivament: (1.99568 ; 0.44925 ; -0.7) i (2.042794 ; 0.288181 ; -0.7).

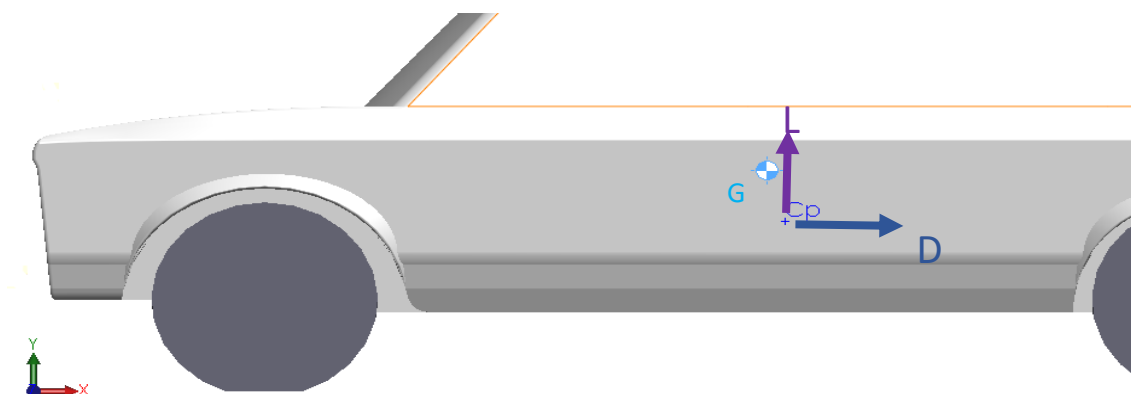


Figura 6.1. Aplicació de les forces al centre de pressions

A la figura 6.1, la "D" representa la força *drag*, la "L" representa la força *lift* i "My" representa el moment de capcineig. Si calculem la distància entre els dos punts, anomenem els paràmetres "a" i "b" com distància en l'eix x i l'eix y, i els seus valors són 0.0471m i 0.1611m respectivament. Un cop definits tots els paràmetres necessaris, es procedeix a calcular el moment mitjançant el Teorema del Moment Cinètic en el punt G:

$$\sum M(G) = -L \cdot a - D \cdot b - My = 0$$

Resolvent la equació anterior, el moment de capcineig queda:

$$My = -L \cdot a - D \cdot b = 270.93 \cdot 0.1611 + 287.96 \cdot 0.0471 = 57.21 \text{ Nm}$$

On la diferència respecte el valor calculat amb fluent és, en tant per cent:

$$\%error = \frac{57.21 - 55.93}{55.93} \cdot 100 = 2.288\%$$

Degut que aquest valor és menor que un 5%, es pot considerar que el resultat és correcte.

Per últim, cal comentar que és el moment de capcineig el que influeix a la dinàmica del vehicle, ja que canvia la distribució de pesos entre l'eix davanter i posterior, fet que influeix a la maniobrabilitat del vehicle. Quan es té un moment de capcineig negatiu com és el cas obtingut en aquesta simulació, a mesura que augmenta la velocitat el morro del vehicle tendeix a ser apretat contra la carretera provocant una tendència a sobrevirar. El sobreviratge és un comportament no desitjat ja que suposa perdre el control total del vehicle i pot acabar en un accident. Tot i això, aquestes petites forces que s'obtenen gairebé no són apreciades per un conductor mig.

Per representar una fulla de ruta del desenvolupament del flux al voltant del vehicle es representa el camp de pressions a la superfície del model. D'aquesta manera, es pot saber on es troben els punts d'estancament i les zones de depressions i sobrepressions. A la figura 6.2 es pot observar aquesta distribució de pressions sobre la superfície. Al Annex A.1 es mostren més representacions del camp de pressions des de diversos punts de vista per complementar el exposat a la memòria. Cal comentar que a les imatges capturades del programa FLUENT tenen una qualitat gràfica bastant baixa i algunes superfícies les representa poc arrodonides, però això és degut que es recomanaria una targeta gràfica del ordinador una mica més potent.

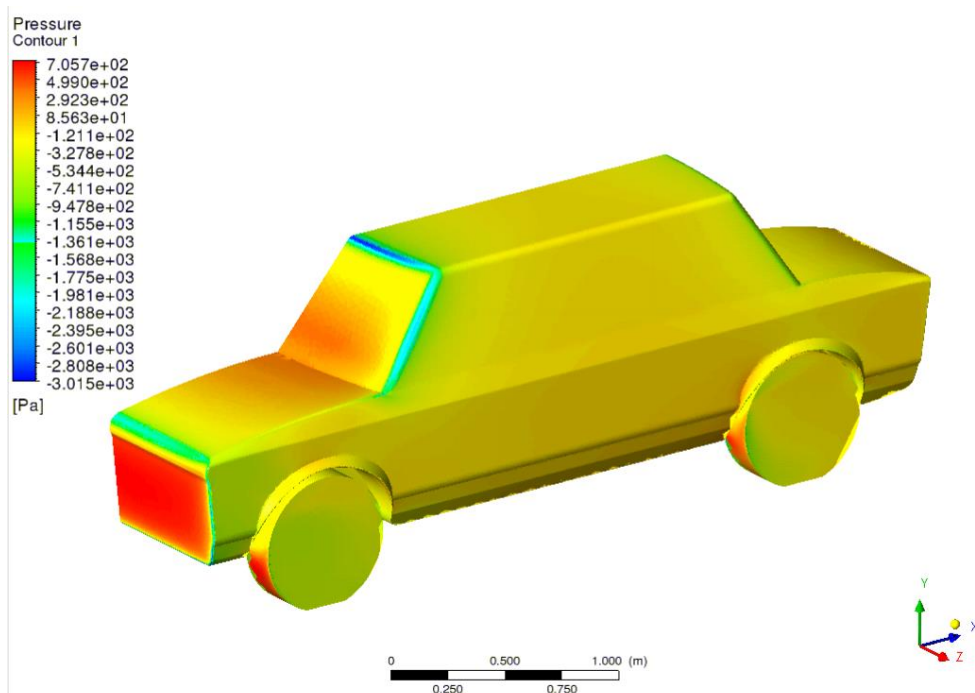


Figura 6.2. Distribució de pressions al voltant del vehicle



A la figura anterior, les zones representades en vermell representen els punts d'estancament, és a dir, on la pressió és màxima i la velocitat mínima. Tal i com s'esperava abans de la simulació, la part frontal del para-xocs, formada per una paret quasi bé plana, està pintada en vermell ja que l'aire impacta contra aquesta zona i es troba sense cap sortida i es queda atrapat allà. D'igual manera, la part inferior de les rodes i també pateixen el mateix comportament que el para-xocs. D'altra banda, les zones representades en blau representen zones de depressió degut a una acceleració del flux, és a dir, la pressió és mínima perquè el flux té una velocitat elevada. Aquestes zones es poden observar al voltant del parabrises i als costats del morro, ja que el flux augmenta de velocitat al reduir l'àrea de pas del flux tal i com ens expliquen les *Equacions de Continuitat*. En aquestes zones d'acceleració és on hi ha el risc de que aparegui el fenomen de separació de la capa límit, formant turbulències i vòrtex en zones no desitjades del vehicle.

De la mateixa manera que s'ha comprovat anteriorment el procediment de càlcul dels moments, també es pot comprovar el resultat de la pressió a la simulació. Aplicant la *Equació de Bernouilli* entre un punt A qualsevol no afectat pel model i un punt B situat al punt d'estancament del morro del vehicle, es pot calcular la pressió aplicada a aquest segon punt, que hauria de ser la mateixa obtinguda per la simulació.

L'equació mostra la formula del *Principi de Bernouilli*:

$$P_A + \frac{1}{2} \rho v_A^2 + \rho g y_A = P_B + \frac{1}{2} \rho v_B^2 + \rho g y_B$$

On:

$$P_A = 0 \text{ Pa}$$

$$P_B = 705.7 \text{ Pa}$$

$$y_A = y_B = 0$$

$$v_A = 33.33 \text{ m/s}$$

$$v_B = 0 \text{ m/s}$$

$$P_B = \frac{v_A^2 \cdot \rho}{2} = \frac{33.33^2 \cdot 1.225}{2} = 680.554 \text{ Pa}$$

Seguidament, calculem l'error relatiu en tant per cent:

$$\%error = \frac{680.554 - 705.7}{705.7} \cdot 100 = -3.563\%$$

Igual que s'ha argumentat abans, l'error relatiu torna a ser menor que un 5% i es considera un resultat bo.

Un cop estudiada la pressió, per completar l'estudi de CFD, cal estudiar l'efecte complementari de la pressió, la velocitat. Estudiar el comportament de les línies de flux i la seva velocitat és un dels passos més importants per entendre el comportament de l'estela que deixa el vehicle al seu darrere i quines zones el flux s'accelera, se separa de la superfície o es queda estancat. D'aquest estudi, juntament amb el de pressió, es

conclouen quines zones seran considerades per a modificar a posteriori per augmentar l'eficiència aerodinàmica del model. A les figures 6.3 i 6.4 es mostren una representació de la velocitat del flux des de la part frontal i posterior respectivament.

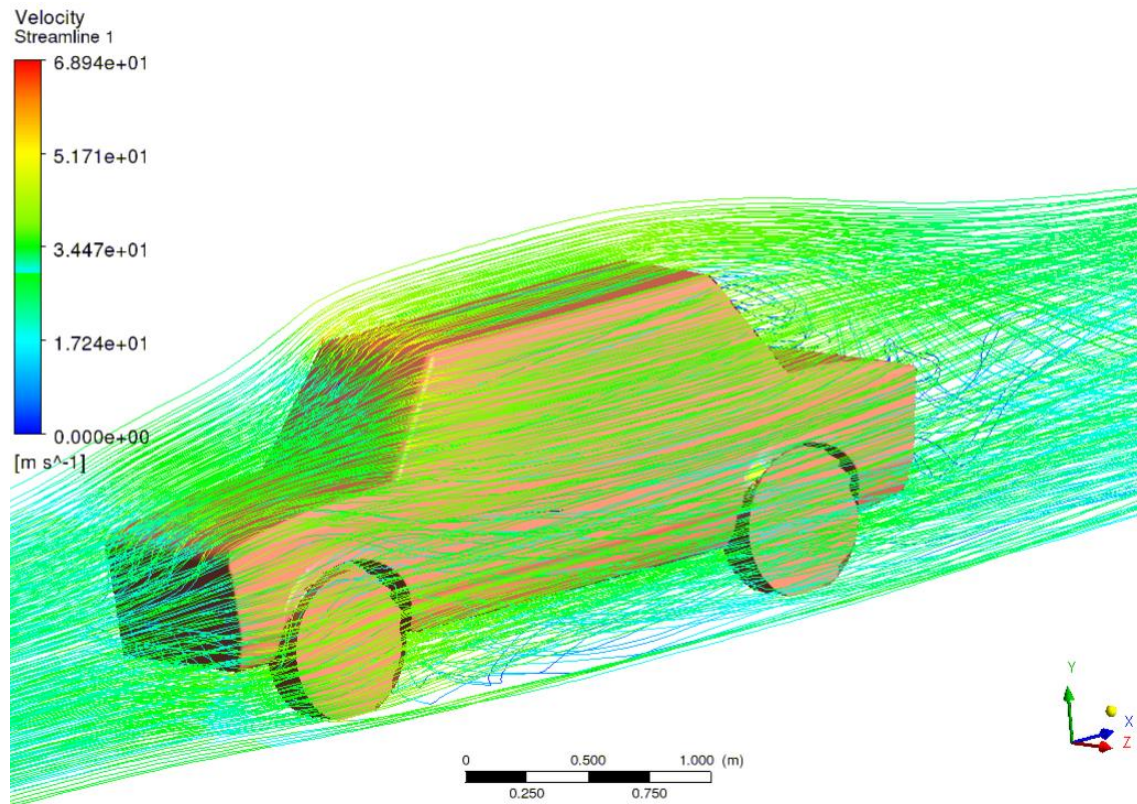


Figura 6.3. Representació del flux i la seva velocitat

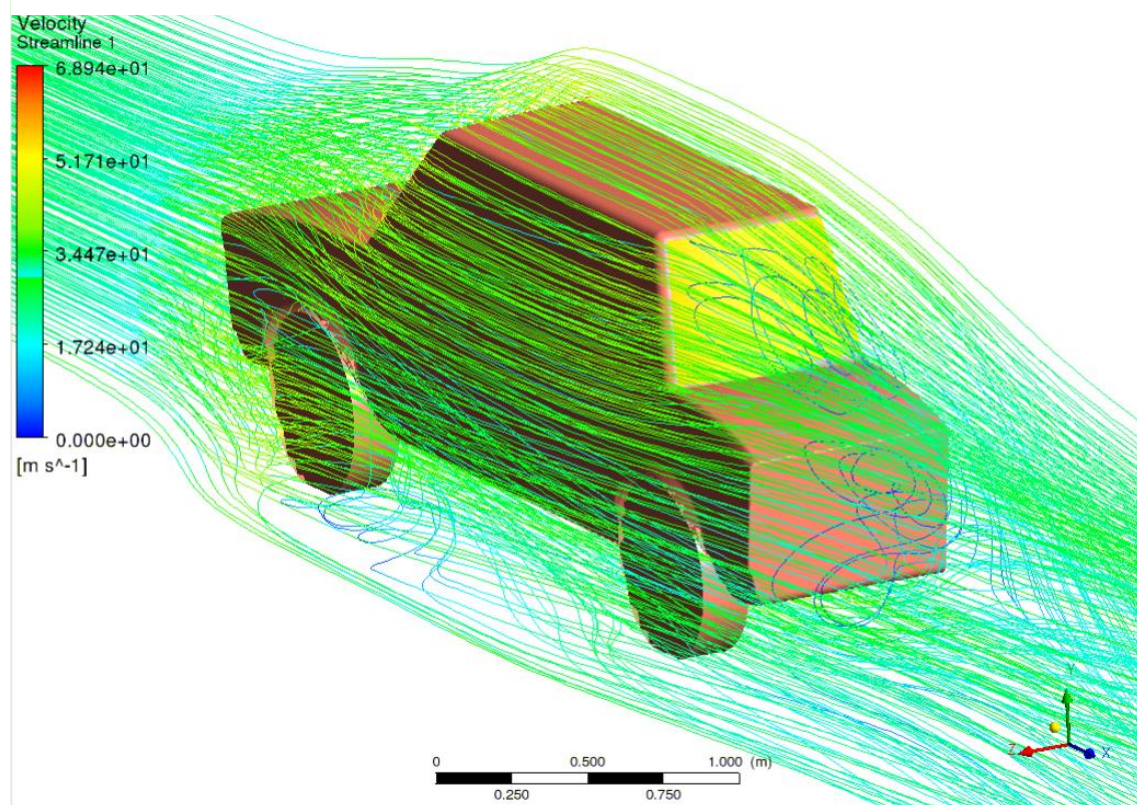


Figura 6.4. Representació del flux i la seva velocitat

Els resultats observats a les figures anteriors concorden amb els de les figures on es representa el camp de pressions, és a dir, que es veu que en les zones on la pressió era baixa (color blau) ara tenen una velocitat molt alta (color vermell), i de forma contrària en les zones on la pressió era alta. També es pot apreciar diferents vòrtex que es produeixen darrere del parabrises posterior i darrere el maleter degut a una geometria poc optimitzada aerodinàmicament. Una altra zona on es localitzen diferents vòrtex és darrere de les rodes davanteres, ja que entra una gran quantitat d'aire a l'espai entre la roda i la carrosseria del vehicle i, al sortir, provoca un flux d'aire que va en una direcció vertical cap a la zona de darrere la roda. A la figura 6.5 es pot observar una turbulència produïda des d'un altre punt de vista i el comportament del flux al voltant del vehicle.

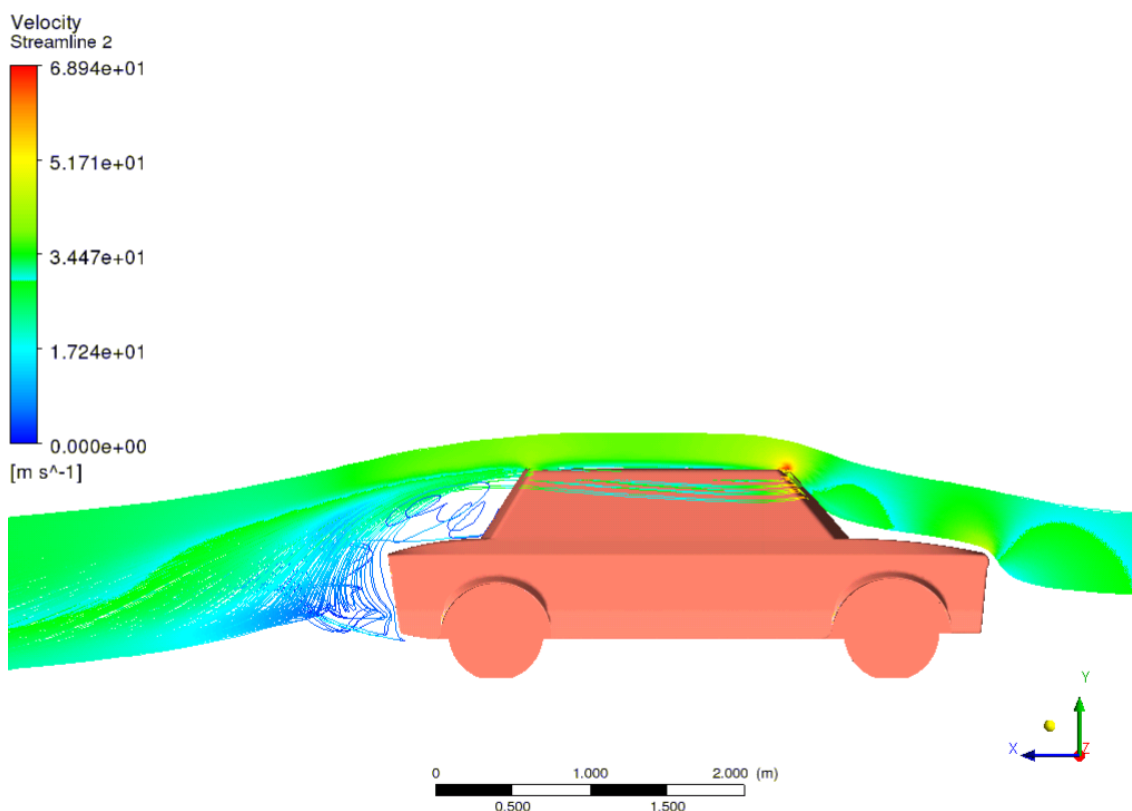


Figura 6.5. Representació del flux per la part superior del vehicle

A més a més, a la figura 6.6 es pot observar una representació de velocitats en dos dimensions on es mostra les zones per on passa el flux al voltant del vehicle i on es produeix la separació de la capa límit. Una altra observació sobre la figura 6.6 és que les línies de flux tendeixen a enganxar-se a la superfície del vehicle en les zones on la velocitat és més alta. Al Annex A.2 es mostren diferents perspectives sobre les línies de flux i la seva velocitat on es pot observar, des de diferents vistes, el seu comportament en les zones més problemàtiques.

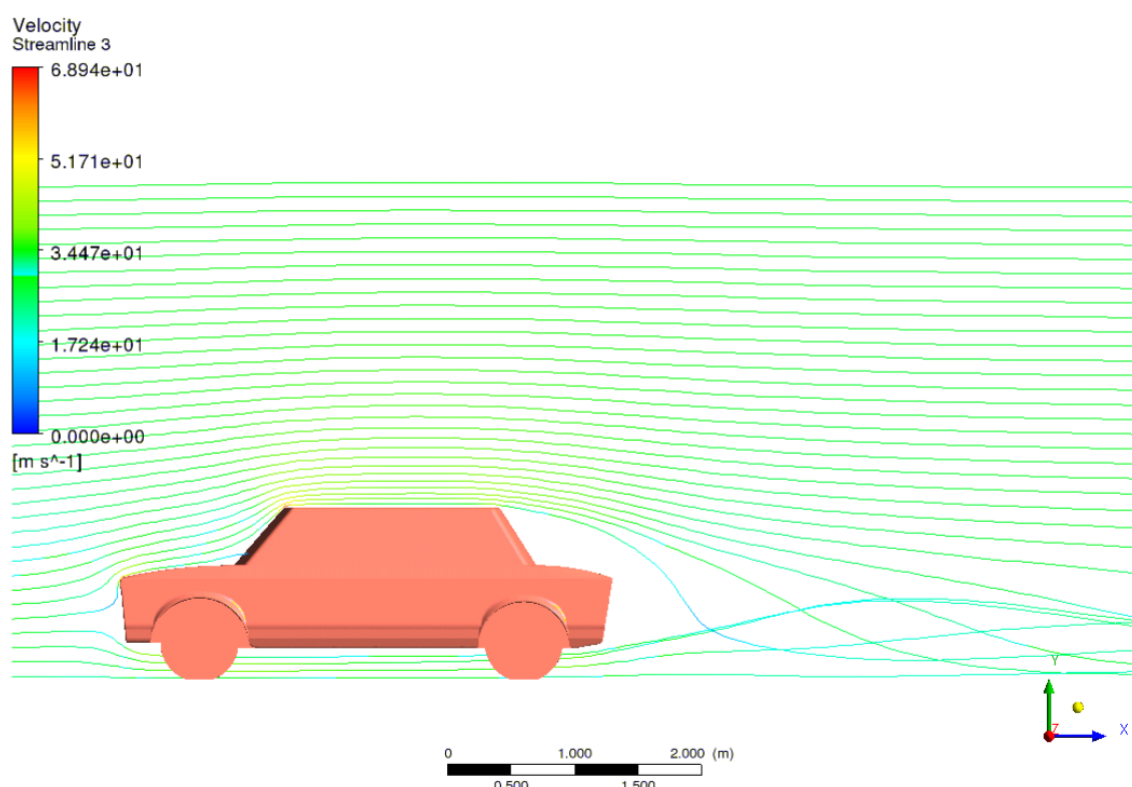


Figura 6.6. Flux en 2D

Per completar l'anàlisi de la simulació, s'ha estudiat amb més detall el comportament de la turbulència a la part posterior del vehicle que, tal i com es pot observar a les figures 6.5 i 6.6, té un comportament complicat.

Per a aquest anàlisi, s'han creat deu plans transversals col·locats darrere el vehicle separats 0.5m entre ells excepte dels dos primers que es troben més junts per captar la zona del maleter. Els plans van des d'on acaba el parabrises posterior fins a una distància de 5m. En aquesta memòria només es mostren les imatges dels plans corresponents a les distàncies: 0m, 1m, 2m, 3m i 4m per poder entendre el comportament d'aquesta zona. La disposició dels plans està representada a la figura 6.7.

La resta de representacions corresponent als altres plans, juntament amb els que es mostren a la memòria, es mostren a les figures des de A.11 fins la figura A.16 de l'Annex A.3

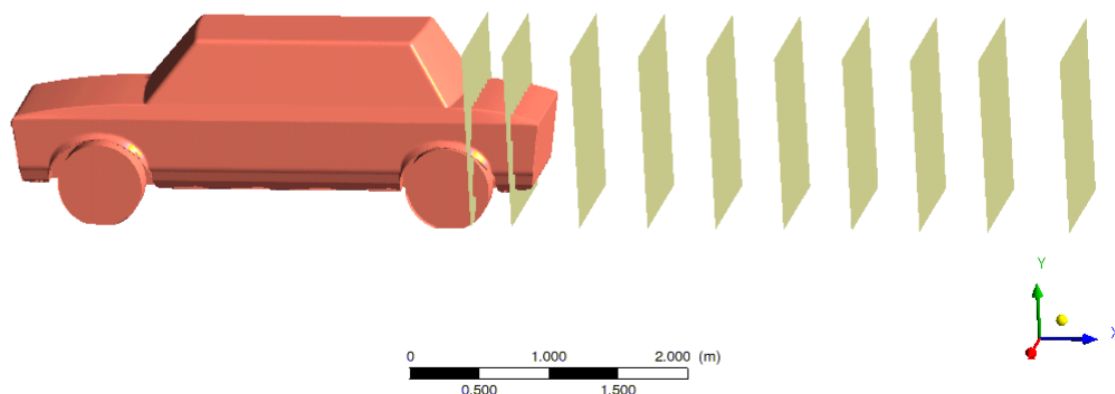


Figura 6.7. Disposició dels plans a estudiar



En els següents plans, es representa la velocitat del flux amb línies de corrent per veure quina forma té la turbulència i els vòrtex. Aquest efecte es mostra a les figures 6.8, 6.9, 6.10, 6.11 i 6.12.

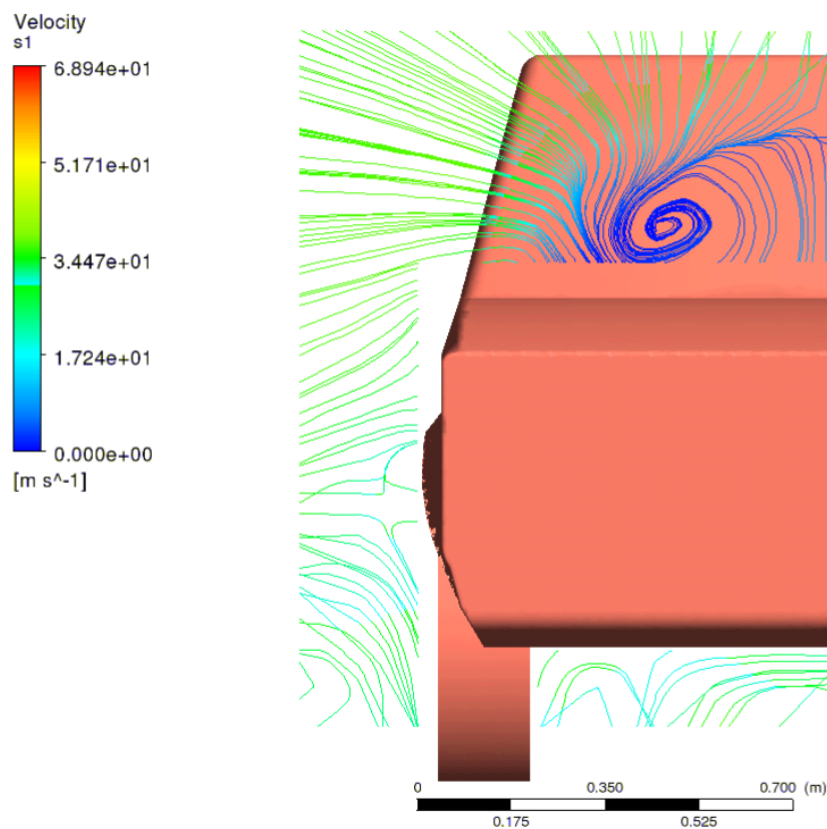


Figura 6.8. Primer pla – 0 m

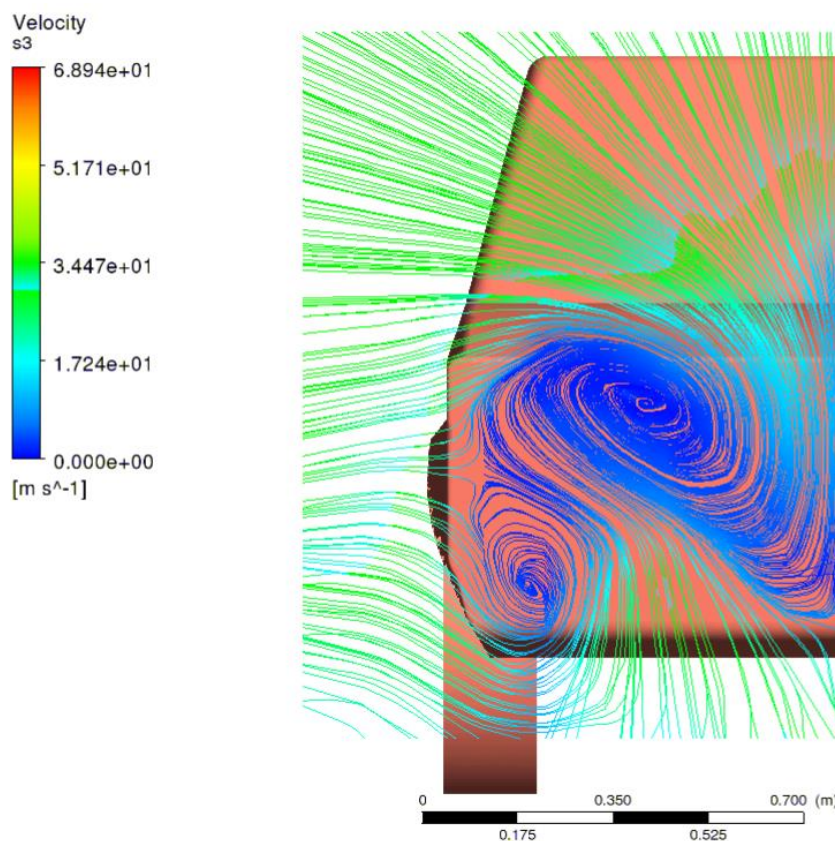


Figura 6.9. Tercer pla – 1 m

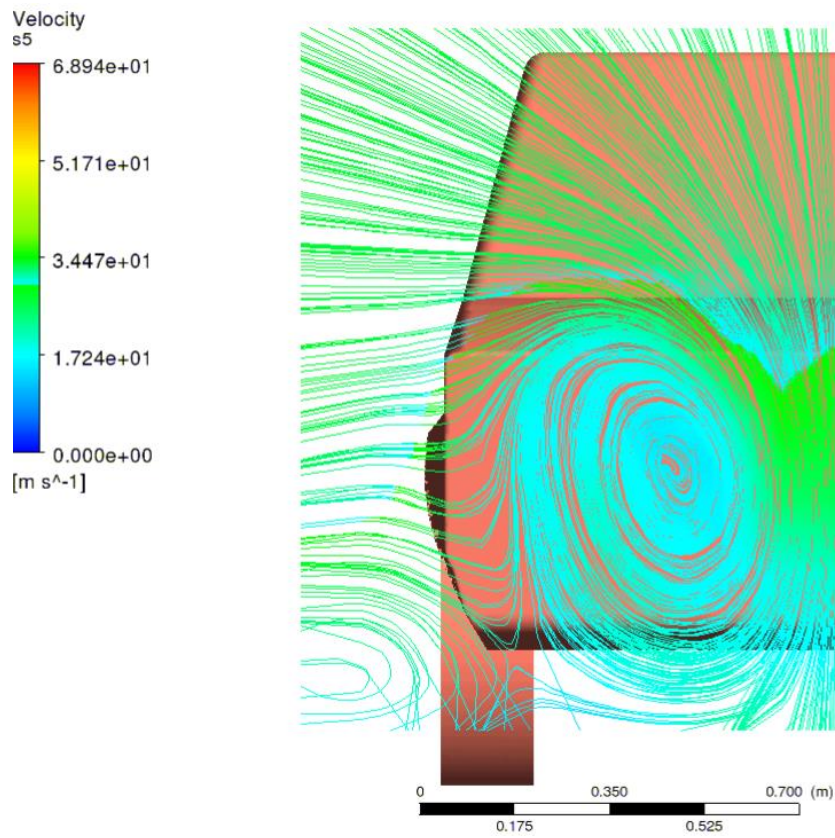


Figura 6.10. Cinquè pla – 2m

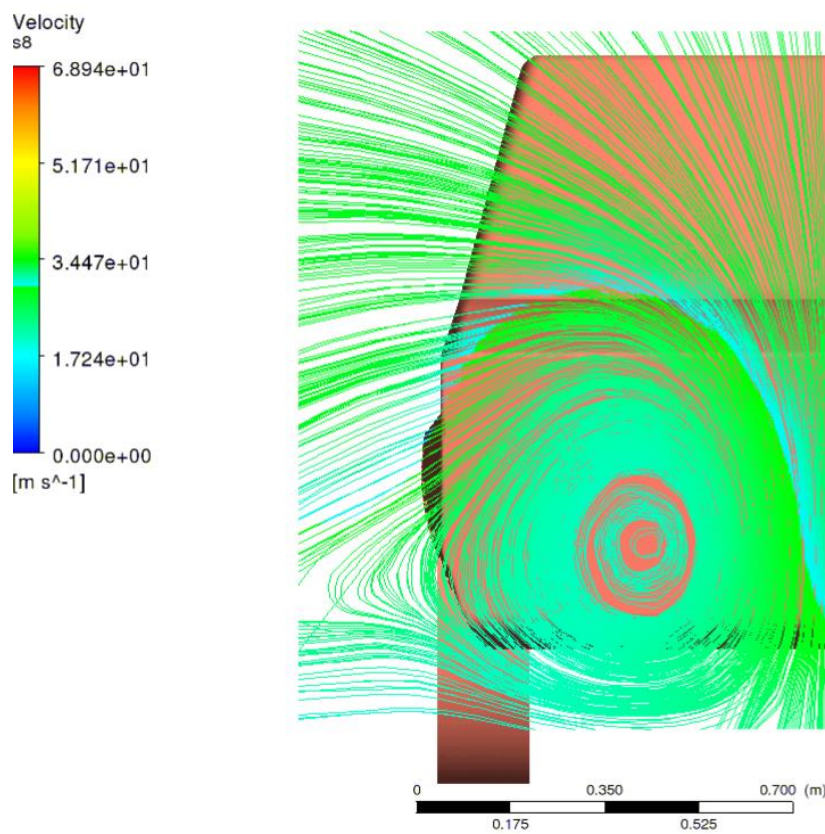


Figura 6.11. Setè pla – 3 m

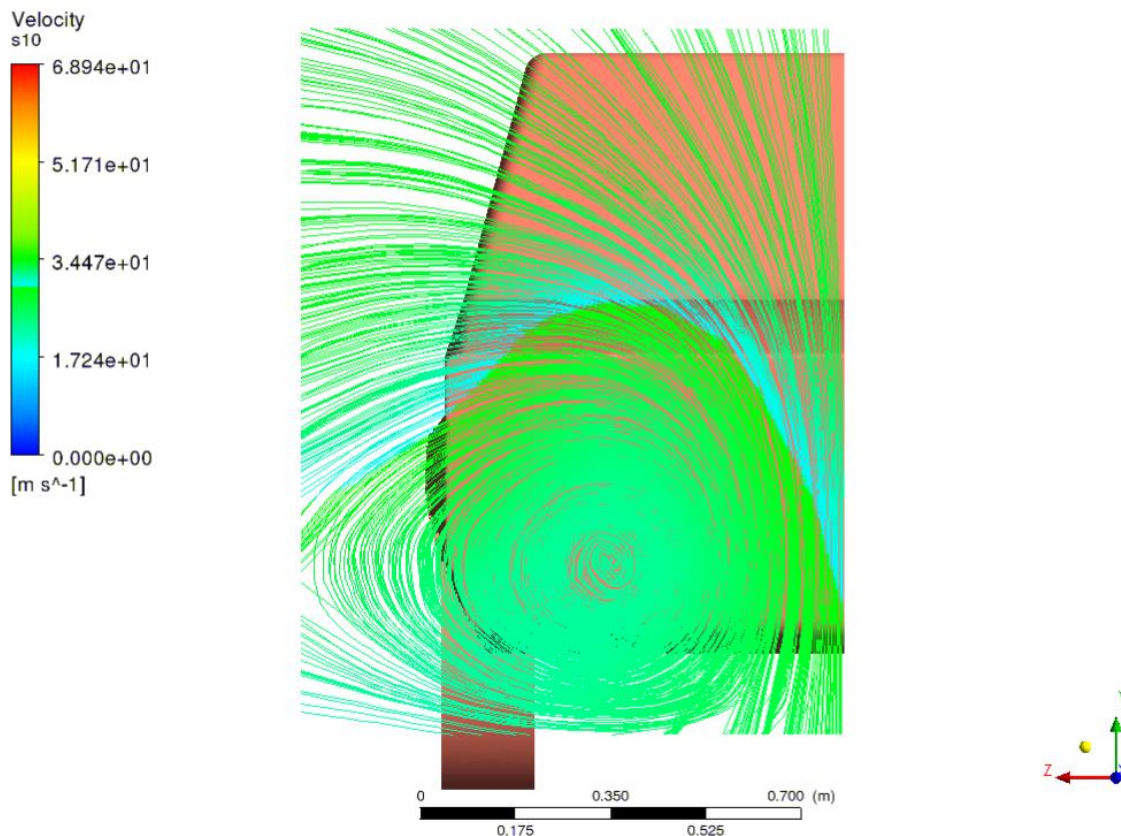


Figura 6.12. Últim pla – 4 m

Tal i com s'ha comentat en el capítol 5 i es pot comprovar en aquestes imatges, a una distància aproximada d'una mica més de la longitud del vehicle, les turbulències queden molt disminuïdes. La figura 6.12 es veu com ja no té res a veure amb el vòrtex que es forma en la figura 6.9 (just darrere el maleter), on la velocitat del flux en aquella zona es veu de color blau per la seva baixa velocitat.

La turbulència en aquesta zona és totalment caòtica i no segueix cap patró. Per aquesta raó, s'ha representat la velocitat en un punt situat en un punt de l'estela del just al darrere del maleter. Aquesta velocitat del vòrtex es mostra a la figura 6.13. Des del moment en que ens allunyem del vehicle, la velocitat es va incrementant i la turbulència es va transformant en un remolí que es propaga fins al final del volum de control.

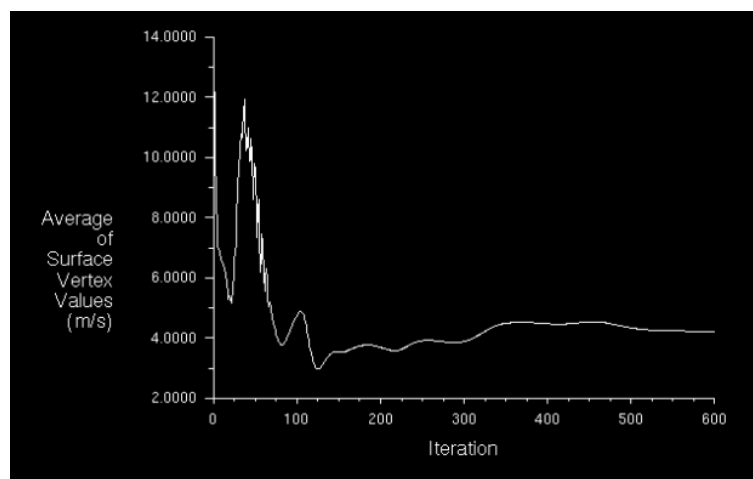


Figura 6.13. Monitorització de la velocitat d'un punt del vòrtex



## 7. Modificacions del model

### 7.1 Primera modificació

Com a primera modificació i abans d'afegir cap tipus d'element aerodinàmic opcional, com per exemple un difusor o un *spoiler*, s'ha proposat suavitzar tota la superfície del vehicle per aconseguir un model més arrodonit i amb una eficiència aerodinàmica molt major. La intenció d'aquesta millora és passar d'un model clàssic, a un model més semblant als actuals amb caire esportiu.

Per escollir les zones a millorar, s'han seguit els apartats 4.4 de la memòria de manera que s'intenta reduir el màxim la resistència a l'avanç i la força de sustentació.

Tal i com s'ha comentat en el apartat 4.3, la part que més influeix en la resistència aerodinàmica és la resistència de pressió creada per el despreniment de la capa límit a la part posterior del vehicle. Per tant, al considerar una primera modificació, s'ha proposat reduir aquesta resistència dràsticament intentant arribar a la geometria d'un model *fastback*, on el sostre s'allarga fins al maleter amb un angle òptim de gairebé  $18^\circ$ . A la figura 7.1 es mostra el moment en que es defineix el croquis de la part de la cabina i el sostre del vehicle

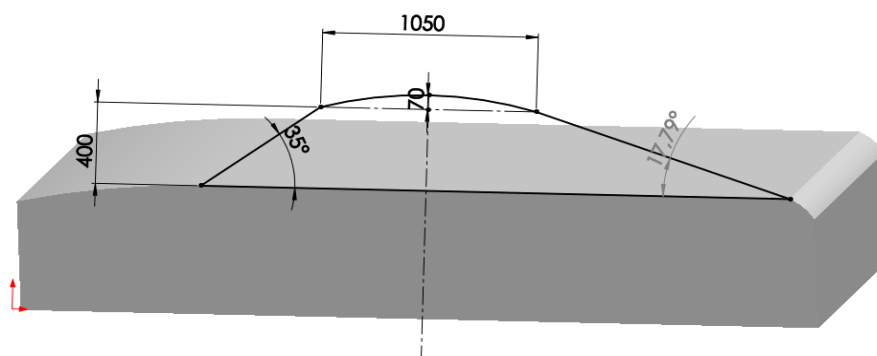


Figura 7.1. Croquis de la cabina del vehicle

En aquesta figura 7.1, també es pot observar que s'ha reduït l'angle del parabrises davanter fins a  $65^\circ$  respecte la vertical, ja que aquest és l'angle mínim permès a partir del qual no es pateix pels reflexos dels rajos solars contra el vidre. Amb aquesta reducció, s'espera reduir un 0.03 el  $C_D$ . Per últim, en aquesta mateixa figura, també es mostra com s'ha afegit una curvatura al sostre per garantir una transició suau del flux cap a la part posterior i, en definitiva, evitar una separació del flux en aquesta zona. L'arrodoniment segueix una relació de  $70/1050 = 0.0667$ , que resulta ser el òptim segons les gràfiques en l'apartat 4.4.3.

Seguidament, s'ha procedit a arrodonir el para-xocs davanter, ja que aquesta és la primera zona on impacta el flux d'aire contra el vehicle i és on s'acumulen les pressions més altes. Aprofitant que es modificava el para-xocs, també s'ha modificat el capó del model, descrivint una corba més suau i amb unes transicions entre les zones amb uns arrodoniments més suaus.

Finalment, s'ha aplicat la tècnica del *boat-tailing* a la part posterior del vehicle garantint d'aquesta manera, que el flux es mantingui enganxat al vehicle a la part posterior i produeixi una estela molt menor. A la figura 7.2 es mostra la geometria del model un cop afegides totes aquestes modificacions.

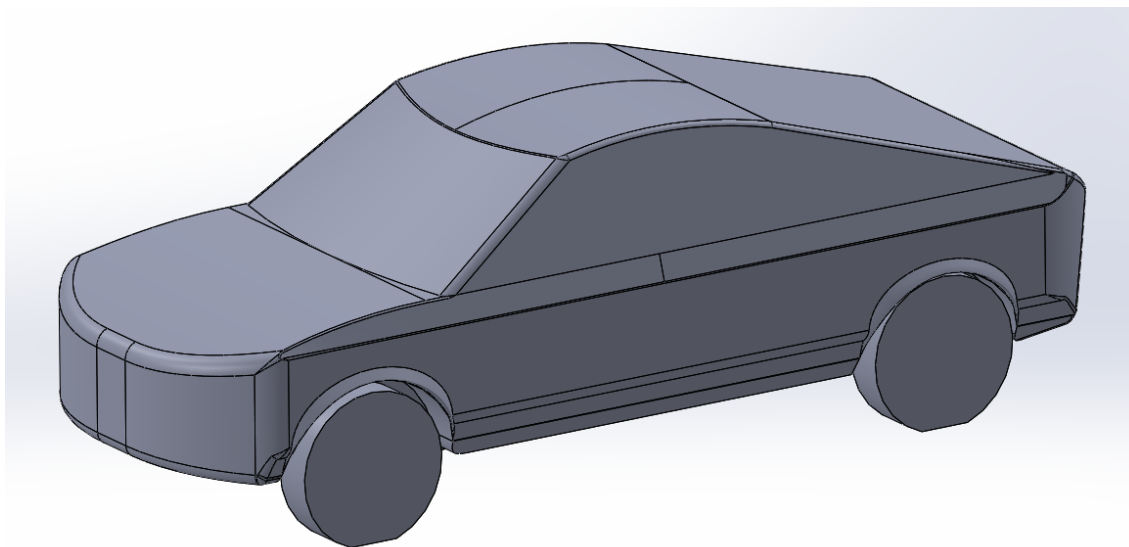


Figura 7.2. Model amb la primera modificació

A la figura 7.3 es mostra el resultat que aporten aquestes modificacions a la distribució de pressions damunt el vehicle. En aquesta figura s'observa que la zona de punts d'estancament al para-xocs no és tant gran com abans, ja que ara el flux pot escapar d'aquella zona gracies a l'arrodoniment.

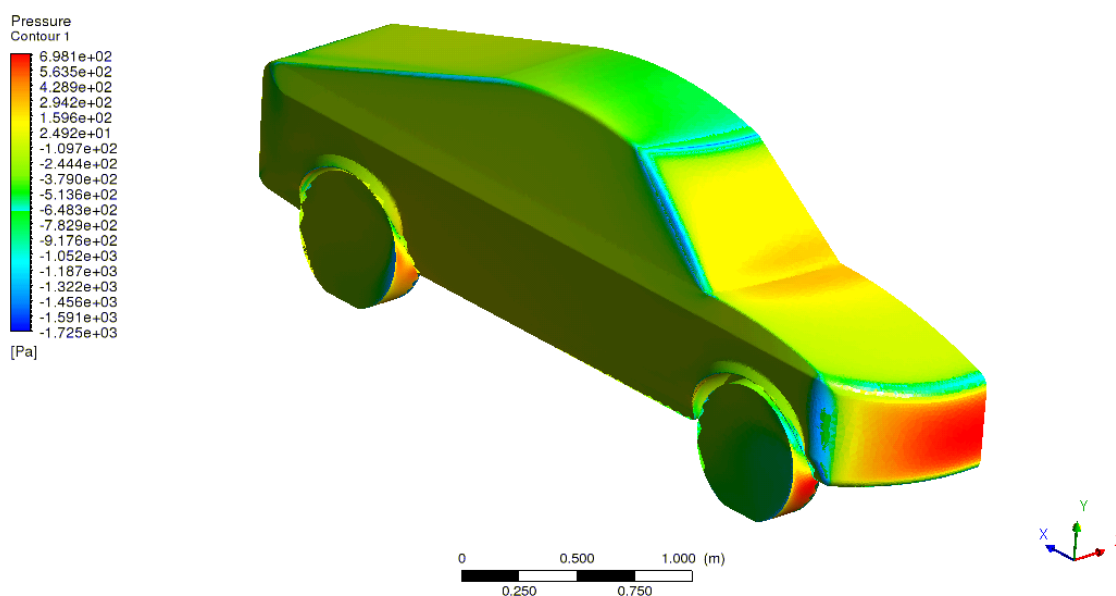


Figura 7.3. Distribució de pressions al voltant del vehicle

A la figura 7.4 es mostra el flux al voltant del vehicle modificat des del pla de simetria. En aquesta figura s'observa que ja no es crea una gran separació de la capa límit en el parabrises, tot i que encara es separa una mica a la intersecció del capó amb parabrises.

Finalment, s'observa que l'estela que es deixa a la part posterior queda molt reduïda, ja que el sostre en forma de *fastback* acompanya l'aire fins a la part inferior.

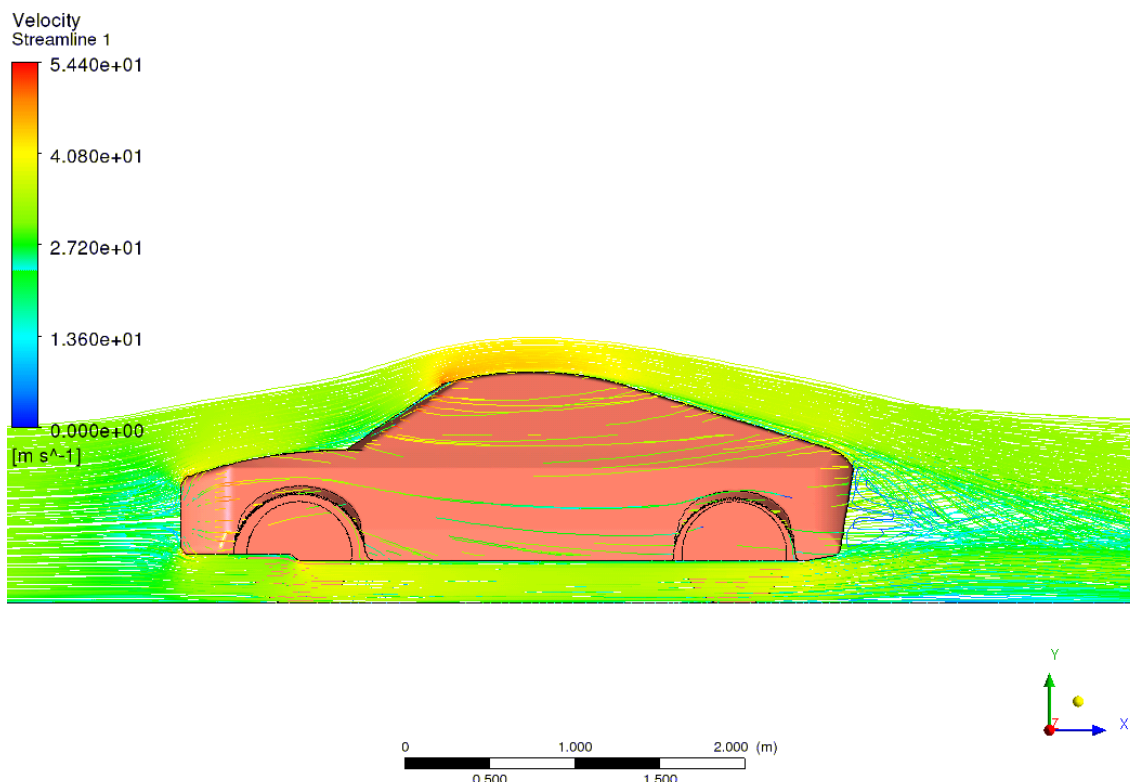


Figura 7.4. Representació del flux i la velocitat al voltant del vehicle

Al Annex B.1 es troben les gràfiques del càlcul de residus per comprovar la convergència i la monitorització dels coeficients aerodinàmics. A més a més, als Annexes B.2 i B.3 es troben altres representacions del camp de pressions i del camp de velocitats respectivament.

Finalment, per tal de recopilar els resultats, a la taula 7.1 es mostren totes els resultats obtinguts en aquesta simulació així com el *Drag*, el *Lift*, el *Pitching moment* i la variació d'aquests valors respecte la simulació original.

Magnitud	Valor	Variació (respecte l'original)	Magnitud	Valor	Variació (respecte l'original)
CD	0.372	-23.77%	Drag	207.07 N	-23.57%
CL	0.699	34.68%	Lift	389.25 N	35.18%
CL/CD	1.879	76.59%	Pitching moment	91.31 Nm	63.26%
CM	0.164	69.07%			

Taula 7.1. Resultats obtinguts de la simulació

Analitzant els resultats de la taula anterior, es pot apreciar la gran disminució del coeficient de resistència al avanç que s'ha aconseguit reduir més d'un 23%. D'altra banda, tenim que el coeficient de sustentació ha augmentat en gran mesura, cosa que pot portar a un comportament no desitjat del vehicle. Aquest gran augment era previsible, ja que hem millorat molt el comportament per la part superior del vehicle sense modificar res de la part inferior. Això ens porta a que el comportament d'aquesta modificació s'assembli una mica al comportament d'una ala d'avió i tendeixi a enlairar-se del terra.

Per aquesta raó, s'ha arribat a la conclusió que les pròximes millores han d'estar enfocades a millorar aquesta força vertical per millorar el comportament del vehicle.

## 7.2 Segona modificació

La segona modificació és, partint del model inicial a optimitzar, afegir un spoiler davanter o *airdam*. S'ha optat per aquesta modificació perquè a les rodes impacta el flux de ple i són les causants de la creació de uns vòrtex que afecten al comportament aerodinàmic del vehicle. L'objectiu del spoiler davanter és modificar el flux d'aire al voltant de les rodes davanteres, intentar reduir el volum d'aire que circula per les rodes i redirigir-lo cap a una altra zona del vehicle. A la figura 7.5 es mostra la modificació realitzada.

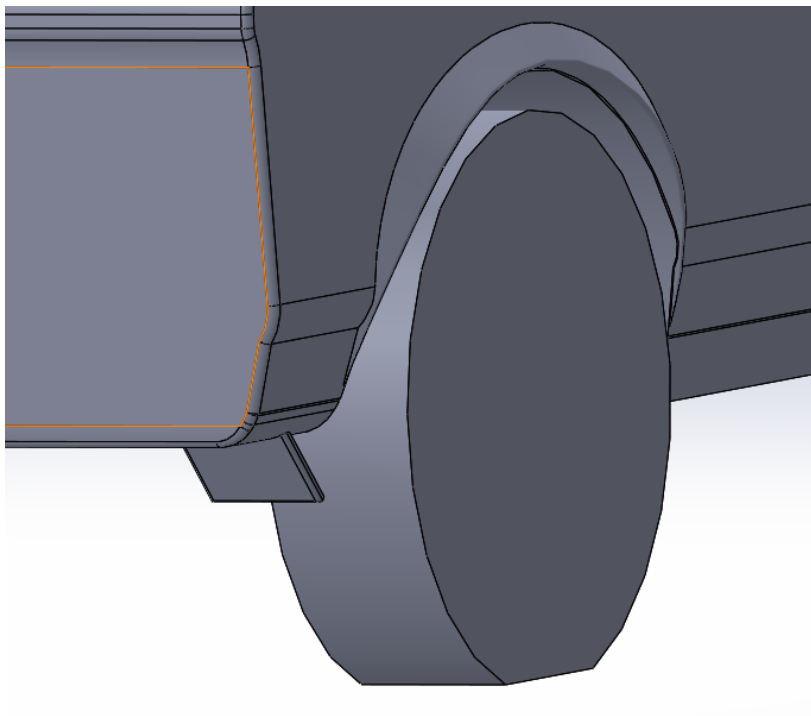


Figura 7.5. Spoiler davanter modificat

A la figura 7.6 es mostra el resultat d'aquesta modificació en el camp de pressions. Com es pot observar, s'ha reduït la superfície de la roda que entra en contacte amb l'aire. Ara és el spoiler el que contacta amb el flux primer, reduint d'aquesta manera, la zona d'estancament de la roda. A la figura 7.7 es mostra el flux al voltant de la roda i s'observa que es desvia cap a baix, disminuint en gran mesura el flux cap a la roda. Tot i això, aquest spoiler no protegeix del tot la superfície de la roda, permetent que el flux sigui capaç d'entrar a la cavitat de la roda amb la carrosseria sense gran dificultat. Per aquesta raó, es considera com a possible modificació futura una geometria diferent per aquest spoiler que desviï encara més aire de les rodes.

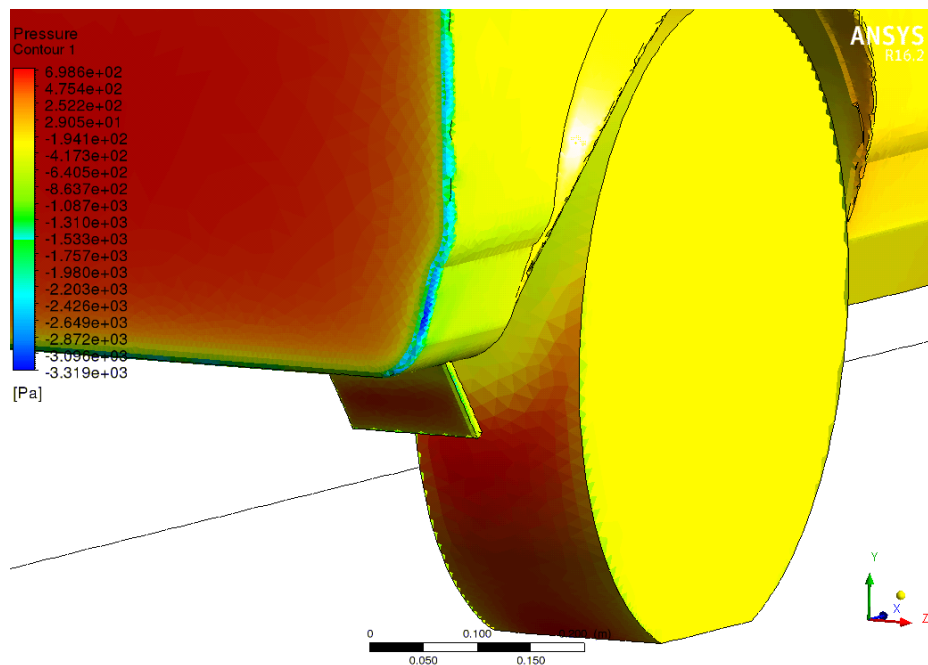


Figura 7.6. Representació del camp de pressions

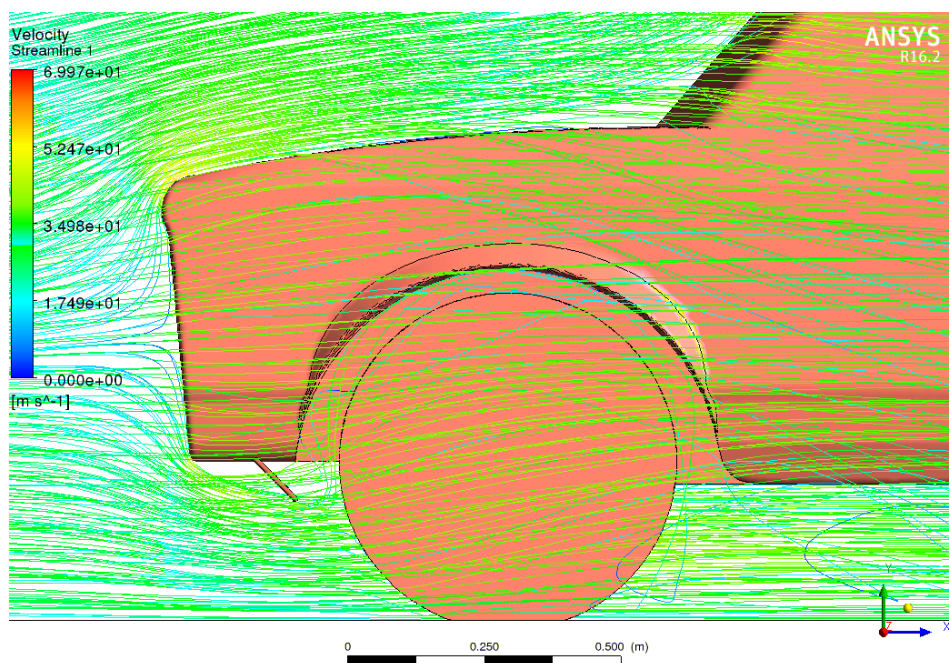


Figura 7.7. Representació del camp de velocitats

Al Annex C.1 es troben les gràfiques del càlcul de residus per comprovar la convergència i la monitorització dels coeficients aerodinàmics. A més a més, als Annexes C.2 i C.3 es troben altres representacions del camp de pressions i del camp de velocitats respectivament.

Com a recopilació de dades dels resultats, a la taula 7.2 es mostren els valors monitoritzats al simular i la variació respecte els valors originals.

Magnitud	Valor	Variació (respecte l'original)	Magnitud	Valor	Variació (respecte l'original)
CD	0.485	-0.62%	Drag	269.74 N	-0.44%
CL	0.505	-2.70%	Lift	281.21 N	-2.34%
CL/CD	1.041	-2.16%	Pitching moment	105.97 Nm	89.47%
CM	0.191	96.90%			

*Taula 7.2. Resultats obtinguts a la simulació*

Com es pot observar a la taula anterior, es pot apreciar la importància que expulsar el flux d'aire de les rodes, ja que tot i la poca superfície que cobreixen els spoiler, aquests redueixen la resistència al avanç un 0.44% i un 2.34% la força de sustentació. el moment de capcineig, assoleix uns valors més normals per un vehicle que el model original, tot i que hagi augmentat en gran mesura. Per tant, queda reflexat que al afegir aquesta modificació, el comportament del vehicle millora substancialment.

### 7.3 Tercera modificació

La tercera modificació del vehicle consisteix a modificar el spoiler davanter per un amb una geometria més comunament utilitzada. Més concretament, aquesta modificació el que canviarà respecte l'anterior és que el spoiler es situarà al morro del vehicle just a sota del para-xocs i envoltarà tota la part inferior. D'aquesta manera, aconseguim un efecte més profitós de l'*airdam*, ja que reduïm la quantitat d'aire que passarà per sota els baixos del cotxe, fet que farà que augmenti la velocitat i, en conseqüència, disminueixi la pressió. Amb aquesta modificació es pretén disminuir el coeficient de sustentació a canvi de un possible petit augment del coeficient de resistència a l'avanç. A la figura 7.8 es mostra la nova geometria del *airdam*.



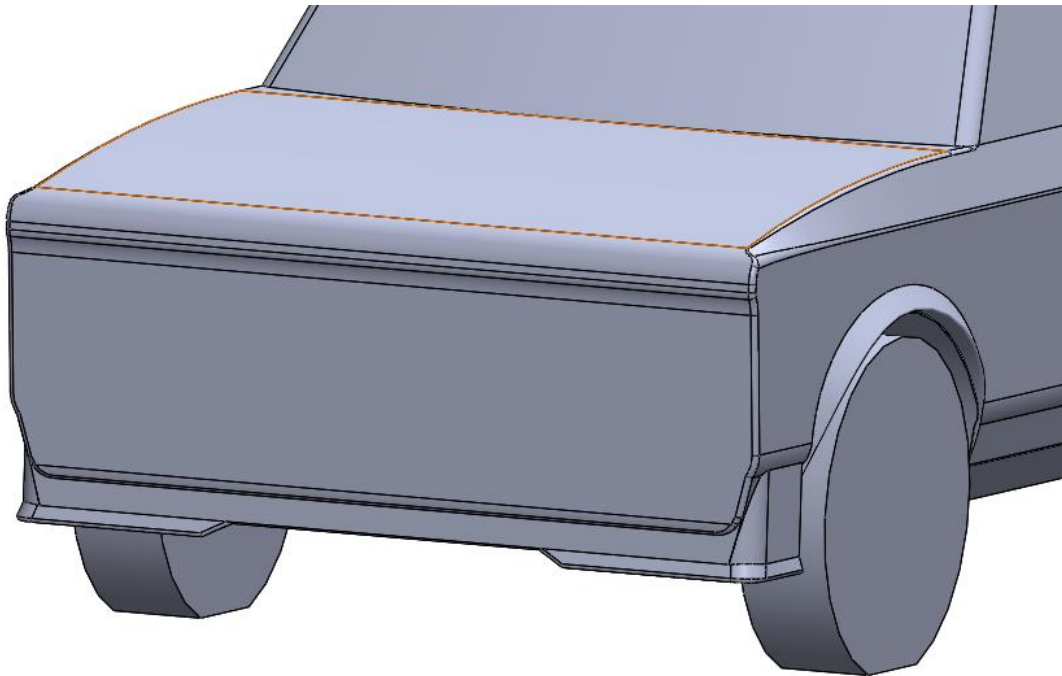


Figura 7.8. Spoiler davanter modificat

A la figura 7.9 es mostra el camp de pressions a la zona frontal del vehicle. Es pot observar que el airdam pateix unes grans pressions a la part frontal i com a la part lateral el flux accelera. Comparativament amb l'anterior spoiler, ara la roda encara rep un impacte menor del flux d'aire i això es veurà reflectit en el lift.

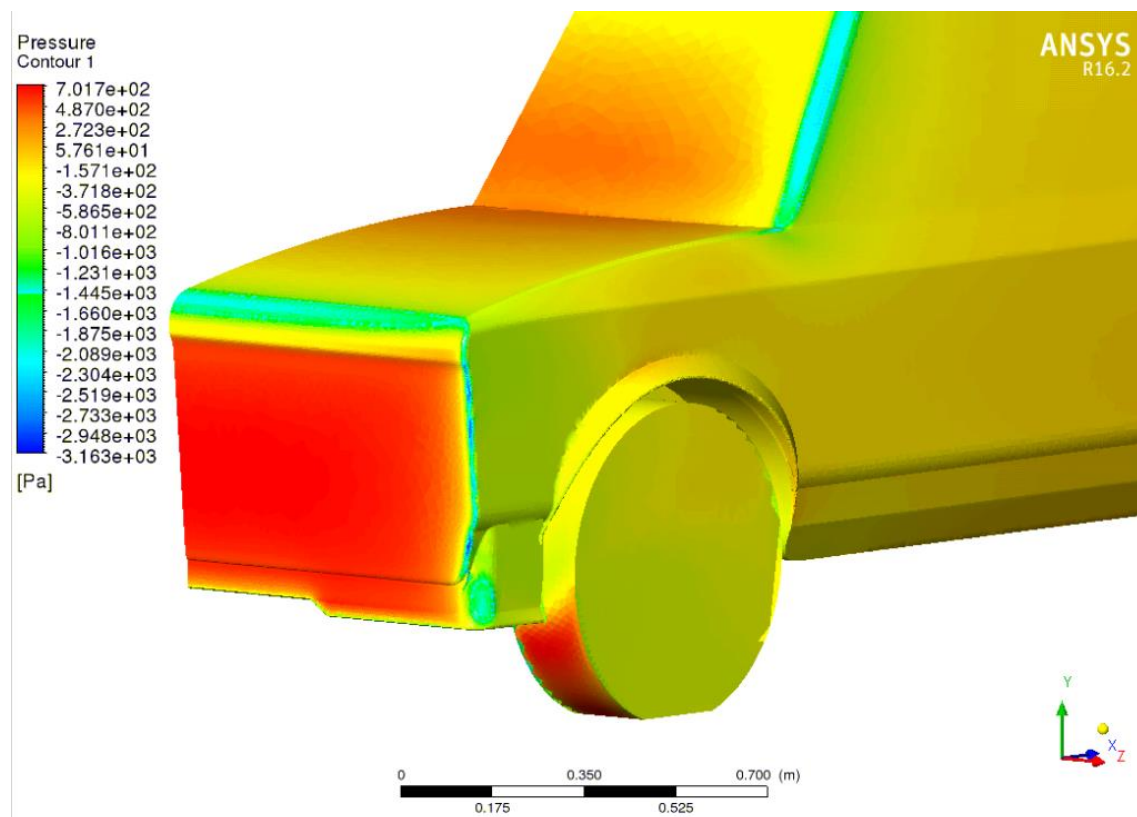


Figura 7.9. Representació del camp de pressions

També s'ha representat les línies de flux a la part frontal tal i com es mostra a la figura 7.10. aquí es veu com el airdam fa que la velocitat per la part inferior del vehicle sigui major i, en conseqüència, la pressió menor. Per últim, s'observa que, tot i aquesta modificació, encara circula aire entremig de la roda i la carrosseria, però aquest flux és molt més reduït que en els casos anteriors.

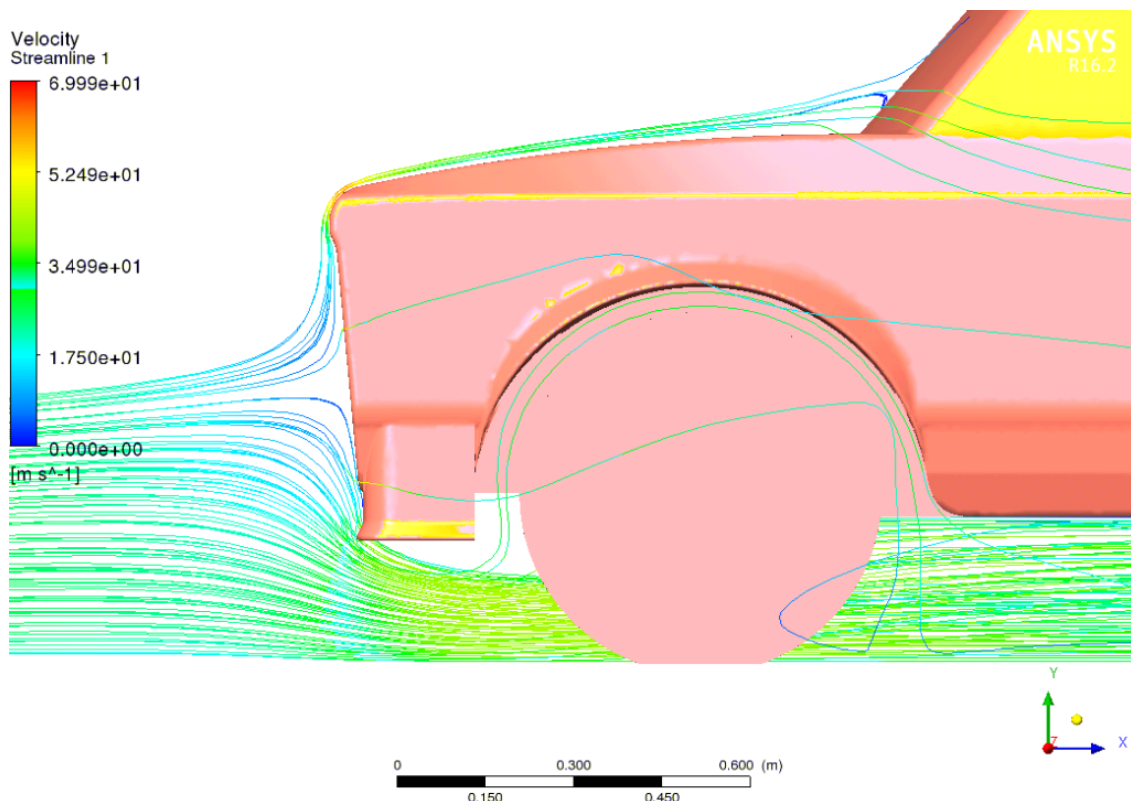


Figura 7.10. Representació del camp de velocitats

Al Annex D.1 es troben les gràfiques del càlcul de residus per comprovar la convergència i la monitorització dels coeficients aerodinàmics. A més a més, als Annexes D.2 i D.3 es troben altres representacions del camp de pressions i del camp de velocitats respectivament.

A la taula 7.3 es recullen els valors numèrics de la simulació. S'observa que el drag ha augmentat una miqueta degut a l'increment de l'àrea projectada en la direcció del flux i a una major zona d'estancament a canvi de una disminució d'un 37.25% en la força de sustentació. per tant, podem afirmar que aquesta millora ha proporcionat els resultats desitjats i esperats.

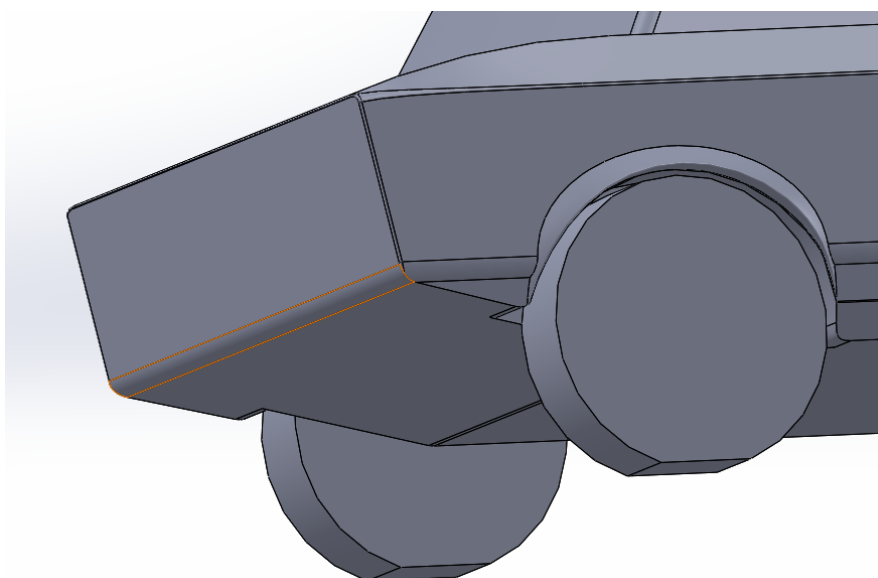
Magnitud	Valor	Variació (respecte l'original)	Magnitud	Valor	Variació (respecte l'original)
CD	0.494	1.23%	Drag	275.94 N	1.84%
CL	0.331	-36.22%	Lift	179.83 N	-37.25%
CL/CD	0.670	-2.16%	Pitching moment	147.56 Nm	163.83%
CM	0.332	96.90%			

Taula 7.3. Resultats de la simulació

#### 7.4 Quarta modificació

Com a quarta modificació, s'ha proposat afegir un difusor a la part posterior del vehicle per a millorar el comportament del flux en aquesta zona. Degut que el major contribuent al drag és la força de pressió, amb aquesta millora es pretén fer arribar una major quantitat de flux a la part on hi ha menys pressió per tal de reduir la diferencia de pressió respecte la part frontal del vehicle.

segons el que s'ha comentat en aquesta memòria, s'ha buscat l'òptim entre la distancia on comença aquest difusor i la altura en que arribarà. Segons la figura 4.27 s'ha escollit una relació entre aquests dos factors de 0.18, i observant el gràfic concloem que el millor angle de difusor és de  $14^\circ$  respecte el terra. A la figura 7.11 es mostra la modificació realitzada.



*Figura 7.11. Vista de la part posterior-inferior del vehicle*

A la figura 7.12 es mostra el resultat d'aquesta modificació en el camp de pressions. Com es pot observar, es veu una zona de baixes pressions al començament i final del difusor que indiquen que la velocitat ha augmentat en aquesta zona degut a que l'àrea de pas també ha augmentat. A la figura 7.13 es mostra el camp de velocitats a la zona posterior del vehicle. Com es pot observar el flux segueix la geometria del difusor expandint-se cap amunt i disminuint l'estela que es produeix. Gracies a aquesta modificació, les turbulències que deixa el vehicle al seu pas es veuen afectades positivament ja que el flux que ve per la part inferior té un comportament controlat i desitjat. Cal comentar que les turbulències que es veuen a la fotografia amb una velocitat baixa són formades per l'impacte de l'aire contra les rodes i no tenen res a veure amb el difusor.

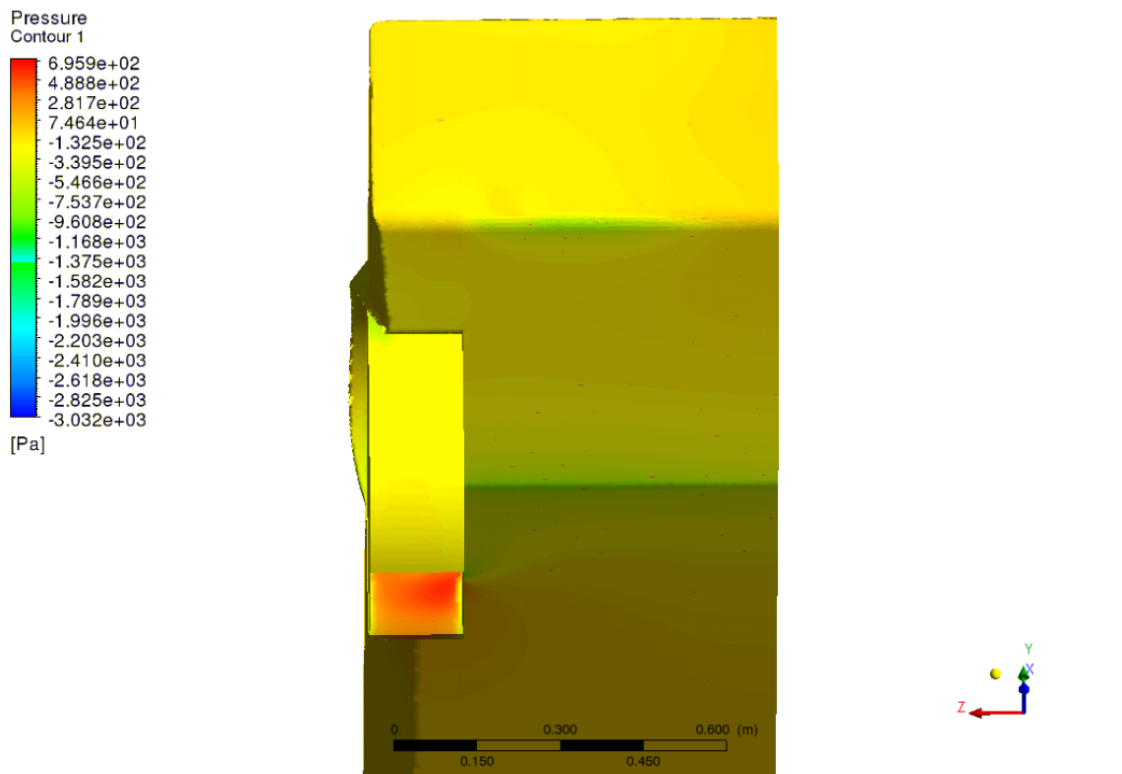


Figura 7.12. Representació del camp de pressions

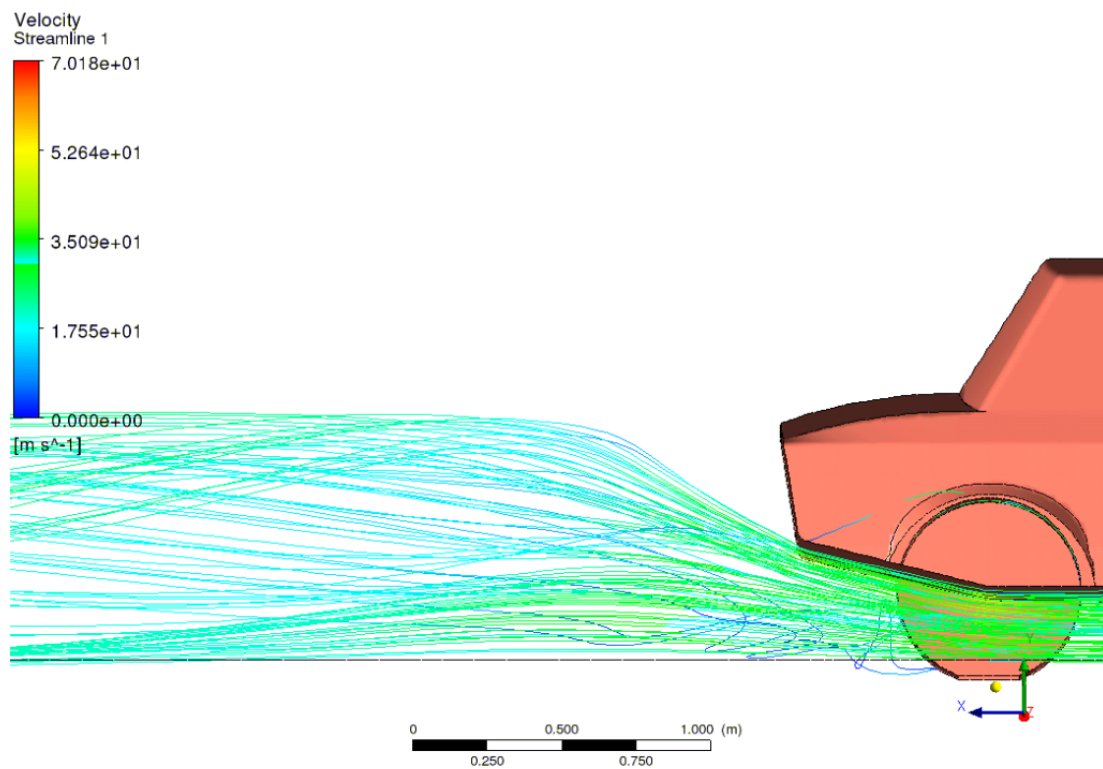


Figura 7.13. Representació del camp de velocitats

Al Annex E.1 es troben les gràfiques del càlcul de residus per comprovar la convergència i la monitorització dels coeficients aerodinàmics. A més a més, als Annexes E.2 i E.3 es troben altres representacions del camp de pressions i del camp de velocitats respectivament.

Com a recopilació de dades dels resultats, a la taula 7.4 es mostren els valors monitoritzats al simular i la variació respecte els valors originals.

Magnitud	Valor	Variació (respecte l'original)	Magnitud	Valor	Variació (respecte l'original)
CD	0.480	-1.63%	Drag	265.78 N	-1.90%
CL	0.431	-16.96%	Lift	239.73 N	-16.75%
CL/CD	0.898	-15.61%	Pitching moment	73.70 Nm	31.78%
CM	0.125	28.86%			

Taula 7.4. Resultats obtinguts a la simulació

Es pot observar a la taula anterior que el drag ha disminuït, tot i que el percentatge de reducció és més baix de l'esperat. D'altra banda, una forta reducció del lift d'un 16.75% fa que aquesta modificació es consideri bona per optimitzar el comportament aerodinàmic del model.

## 7.5 Cinquena modificació

En aquesta penúltima modificació, es vol crear un element que esta molt de moda en el disseny dels turismes de sèrie actuals. Aquest element és un spoiler posterior. Un spoiler posterior te la funció de crear una zona de separació del flux i empatxar-lo cap amunt. D'aquesta manera, augmentem en gran mesura el downforce a la part posterior del vehicle i disminuïm el coeficient de sustentació.

A l'hora de dissenyar aquesta modificació s'ha tingut en compte que, en el model original del Fiat 128, no circula un flux d'aire sense turbulències per la part posterior del maleter. Donat que aquesta era la part on es volia col·locar aquest spoiler, s'ha procedit a aplicar la millora a la geometria del model optimitzat en la modificació 1, en la que es van modificar diferents aspectes de la cabina i el morro del vehicle. A la figura 7.14 es mostra la aplicació de la geometria al model.

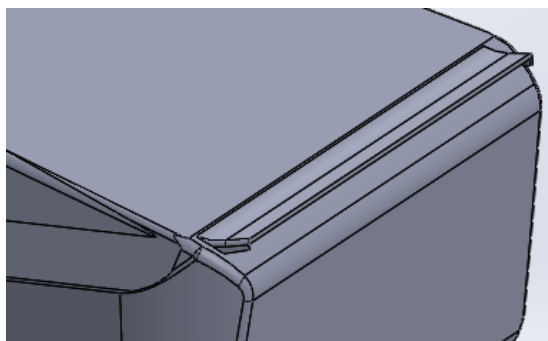


Figura 7.14. Vista posterior-superior del model

Els resultats en el camp de pressions es mostren a la figura 7.15, on s'observa que el spoiler crea una zona d'altres pressions ja que la velocitat en aquella zona queda atrapada allà. A la figura 7.16 es mostra el camp de velocitats on es pot entendre més fàcilment el comportament del flux en aquesta zona. Observant les línies de flux podem observar que, tal i com s'ha intuït al crear la geometria, el flux es empuixat cap amunt.

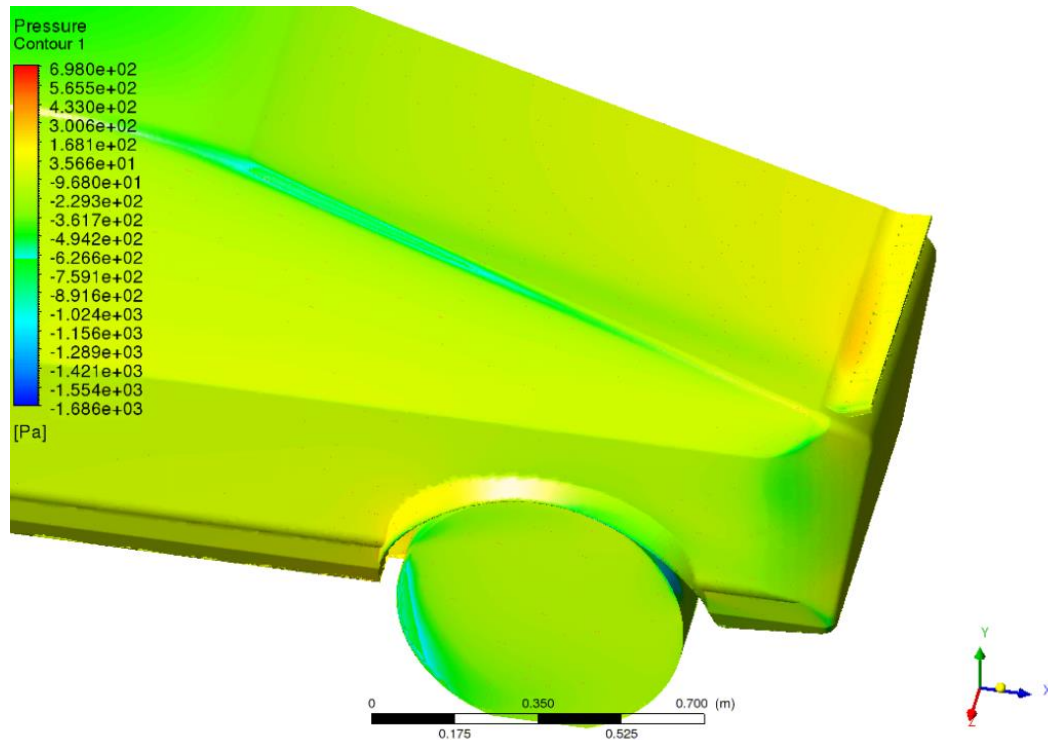


Figura 7.15. Representació del camp de pressions

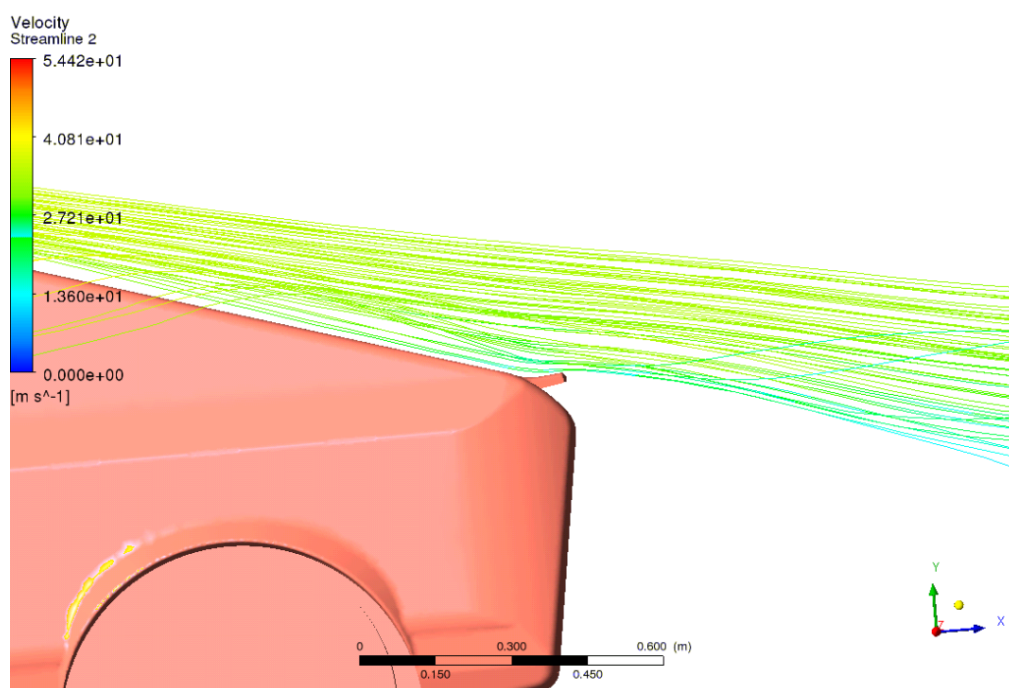


Figura 7.15. Representació del camp de velocitats



Al Annex F.1 es troben les gràfiques del càlcul de residus per comprovar la convergència i la monitorització dels coeficients aerodinàmics. A més a més, als Annexes F.2 i F.3 es troben altres representacions del camp de pressions i del camp de velocitats respectivament.

La recopilació de resultats de la simulació es mostren a la taula 7.5, juntament amb la variació respecte els valors de la simulació de la primera modificació.

Magnitud	Valor	Variació (respecte modif.1)	Magnitud	Valor	Variació (respecte modif.1)
CD	0.339	-8.87 %	Drag	188.87 N	-8.79 %
CL	0.428	-38.77 %	Lift	238.23 N	-38.80 %
CL/CD	1.263	-32.78 %	Pitching moment	91.76 Nm	0.49 %
CM	0.165	0.61 %			

*Taula 7.5. Resultats obtinguts a la simulació*

Observant aquesta ultima taula podem observar que es redueix el drag en un 8.79 % ja que es produeix una considerable millora al comportament de l'estela del vehicle. D'altra banda, tal i com s'ha predit al dissenyar la modificació, s'aconsegueix reduir de gran manera el coeficient de sustentació en un 38.8 %. Fet que soluciona en gran part el problema que s'ha detectat al simular la primera modificació, que s'arribava a una força de sustentació massa elevada.

## 7.6 Sisena modificació

Per últim, la sisena modificació consisteix en la implementació de totes les ultimes millores juntes en un sol model, ja que en un estudi d'aerodinàmica, el resultat d'una millora pot donar un resultat diferent per si sol que quan s'aplica juntament a altres millores. Amb aquesta intenció, s'ha aplicat la millora de la geometria, un *airdam*, un spoiler posterior i un difusor.

A la figura 7.16 es mostra una representació del camp de pressions a la part de la roda frontal on s'observa que el spoiler davanter protegeix en gran mesura de l'impacte directe del flux contra la roda. Amb aquest nou spoiler, el canvi entre les zones vermelles (altes pressions) i les zones verdes (baixes pressions) són més suavitzades, de manera que el flux tindrà un comportament més suau en aquesta zona. A més a més, a la figura 7.17 es mostra una representació del camp de velocitats al voltant de tot el vehicle on es veu que, tal i com s'ha comentat abans, el flux que va per sota i per dalt, al trobar-se a la part posterior del vehicle, tenen un comportament menys turbulent i formant uns vòrtex més petits.

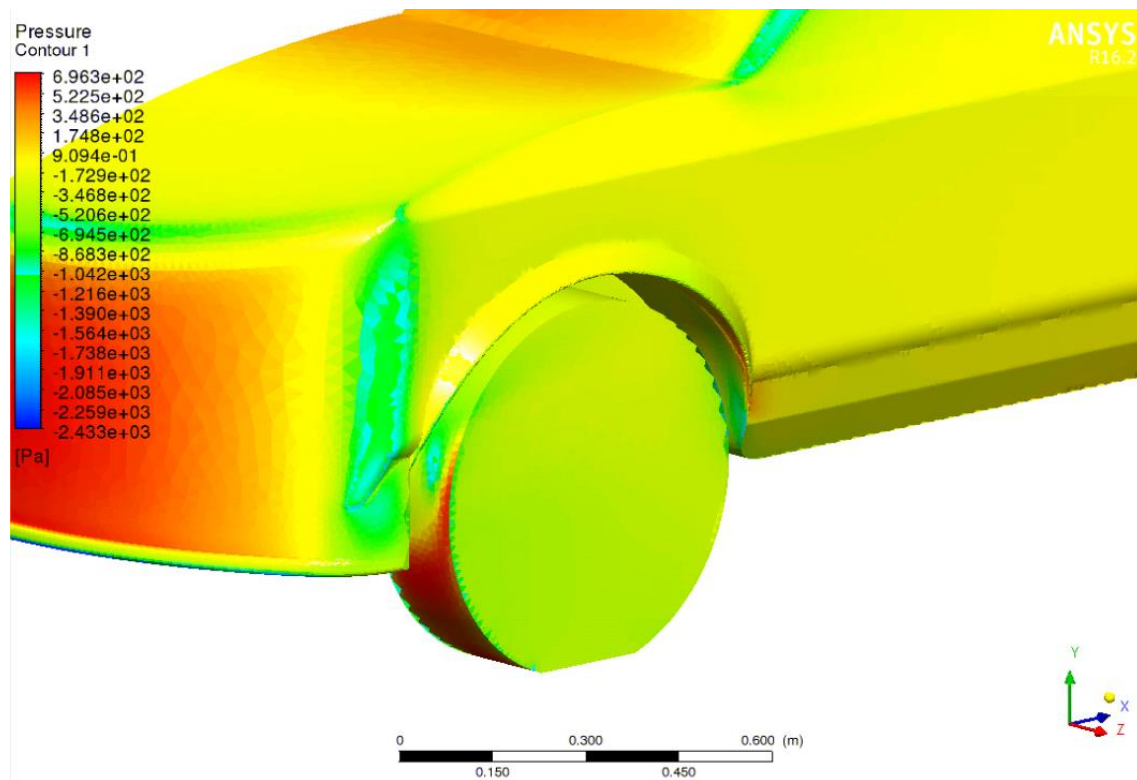


Figura 7.16. Representació del camp de pressions

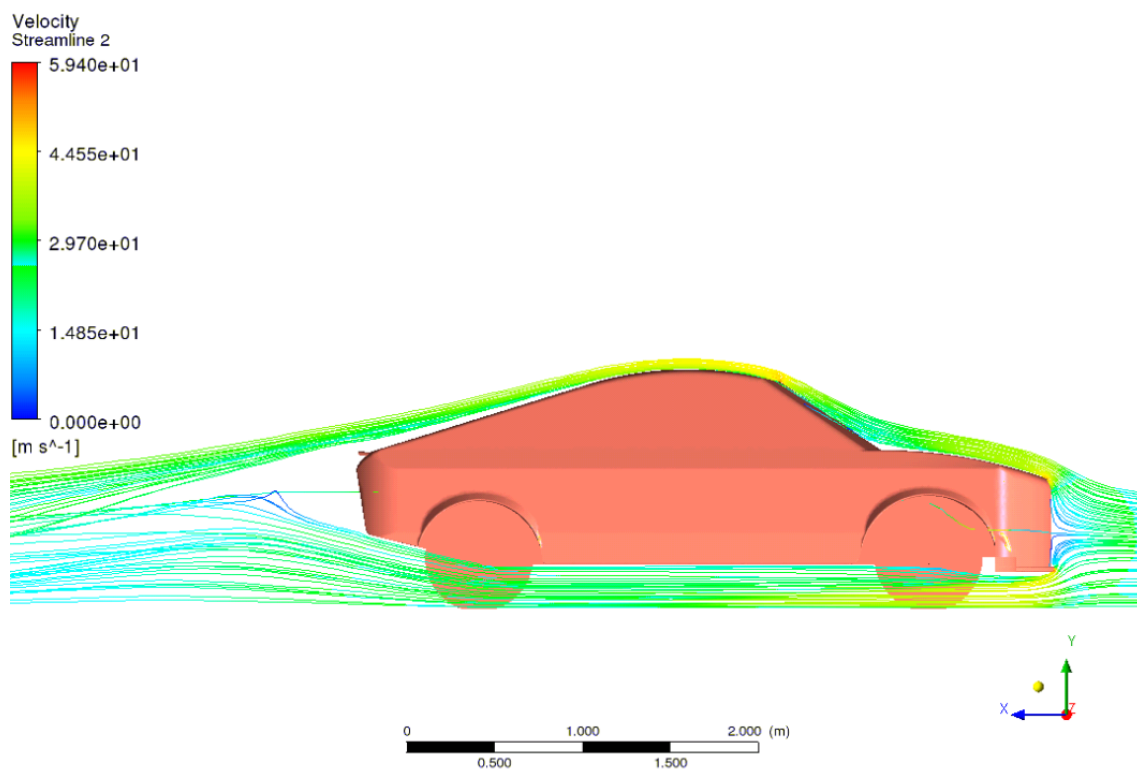


Figura 7.17. Representació del camp de velocitats

Al Annex G.1 es troben les gràfiques del càlcul de residus per comprovar la convergència i la monitorització dels coeficients aerodinàmics. A més a més, als Annexes G.2 i G.3 es troben altres representacions del camp de pressions i del camp de velocitats respectivament.

La recopilació de resultats de la simulació es mostren a la taula 7.6, juntament amb la variació respecte els valors de la simulació de la primera modificació. És important recalcar que s'ha aconseguit una millora total del drag d'un 25% que suposa un gran estalvi en combustible i en potencia del motor. Però el que és més important, és que s'ha aconseguit una reducció del lift d'un 57.7%, fet que suposa que el vehicle sigui més estable i, per tant, el comportament a les corbes és millor.

Per últim, el moment de capcineig segueix amb un valor molt major que el del model original, degut a que el centre de pressions ha canviat dràsticament d'una simulació a l'altra. Això ha provocat que l'aplicació de les forces sigui més llunyana al centre de gravetat (on s'aplica el moment) i resulti en uns valors més grans. Tot i això, els valors del moment de capcineig no són valors desproporcionats i s'accepten com a correctes.

Magnitud	Valor	Variació (respecte l'original)	Magnitud	Valor	Variació (respecte l'original)
$C_D$	0.353	-27.66%	Drag	202.16 N	-25.38%
$C_L$	0.213	-58.96%	Lift	121.80 N	-57.70%
$C_L/C_D$	0.603	-43.33%	Pitching moment	217.67 Nm	289.18%
$C_M$	0.381	292.78%			

*Taula 7.6. Resultats obtinguts a la simulació*

## 8. Planificació temporal i econòmica

### 8.1 Planificació temporal

En la creació de la planificació temporal, s'ha tingut en compte des del principi que ja estava decidit que es demanaria una prorroga del treball fins a finals d'estiu. La promotora d'aquesta decisió va venir per part de l'ETSEIB, ja que prorrogant el projecte fins al setembre era la única manera de poder seguir amb un conveni de pràctiques amb l'empresa que s'ha estat treballant durant tota l'etapa del projecte. Per tant, tenint en compte que la duració del Treball de Final de Grau arribarà fins a finals d'estiu, la planificació s'ha adaptat a aquest període de temps. El projecte pot dividir-se en diferents etapes coincidint amb els temes exposats en el treball de manera cronològica. Aquestes etapes es mostren en la figura 8.1 amb un diagrama de Gantt.

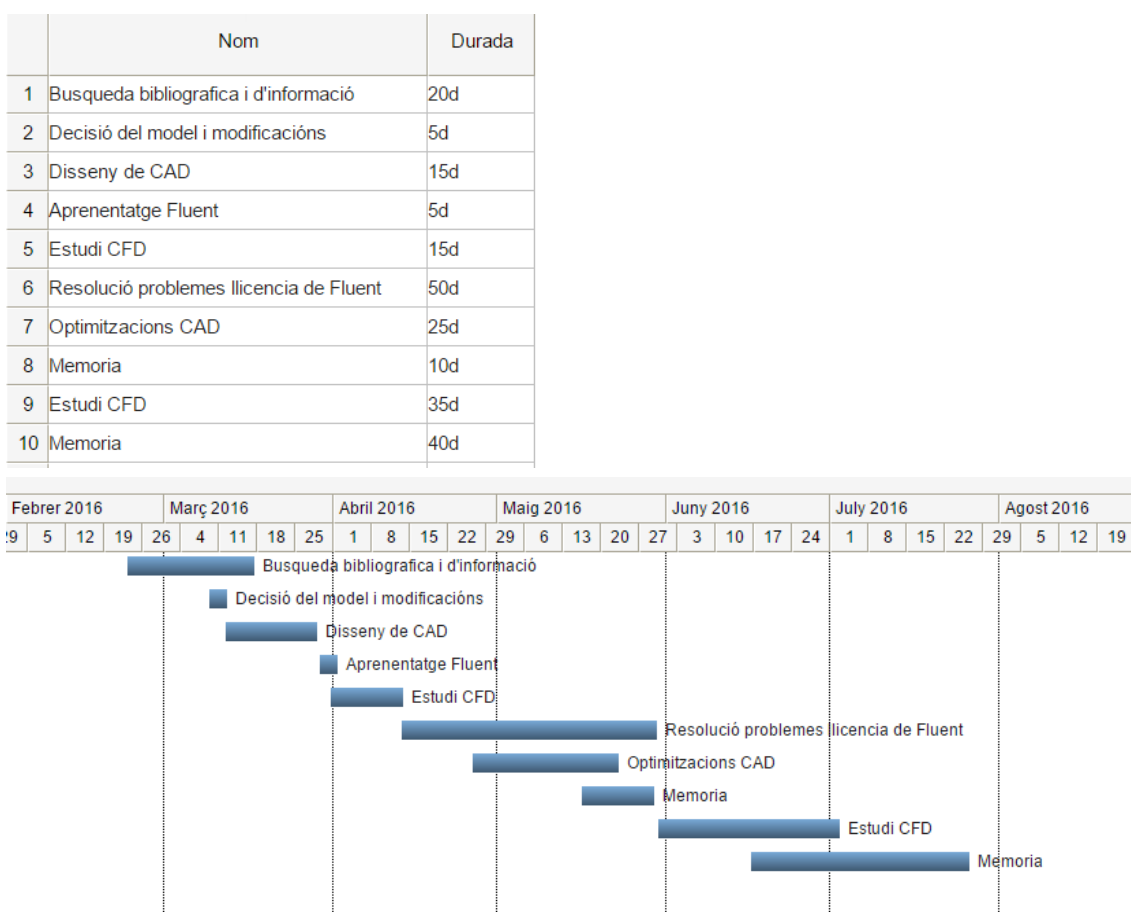


Figura 8.1. Diagrama de Gantt

El camí crític d'aquestes activitats està format per les parts de recerca d'informació en un principi, seguit per la creació dels CAD i, per últim, les simulacions CFD.

Cal destacar que una petita part de la memòria es va anar realitzant a mesura que avançava en el treball, encara que va ser al acabar totes les simulacions quan es va dedicar la major part del temps.

## 8.2 Planificació econòmica

El càlcul del pressupost del projecte es basa en quatre apartats: costos d'enginyeria, software, consum d'energia i amortització.

El pressupost d'enginyeria representa el salari que hauria de guanyar l'enginyer per la realització del projecte. El salari s'ha calculat tenint en compte una remuneració de 15€/h a mitja jornada, és a dir, 4h/dia. Això, multiplicat pels dies que dura el projecte (restant les hores d'aprenentatge i de resolució de problemes de llicència del Fluent), 165 dies, resulta un total de 660h remunerades.

El pressupost de software és provablement el més car, ja que les llicències dels programes d'enginyeria acostumen a tenir un valor molt alt. Per la realització de la memòria s'ha utilitzat el programa *MICROSOFT OFFICE*, el qual s'ha adquirit una llicència d'un any. Per la creació de les geometries CAD s'ha utilitzat una llicència anual del programa *SOLIDWORKS 2015*. Finalment, per l'estudi de CFD s'ha procedit a llogar una llicència completa durant l'etapa del projecte del programa *ANSYS FLUENT 16.2*.

El càlcul del consum elèctric es basa majoritàriament en el consum del ordinador portàtil. Per al seu càlcul, s'ha tingut en compte la potència màxima del transformador, 90 W, considerant un preu de la llum de 0.15€/kWh.

En el càlcul de la amortització del ordinador portàtil, s'ha tingut en compte una vida útil de 10 anys i un percentatge de pèrdua de valor anual de 10%.

En les taules de la 8.1 fins la 8.6 es mostren els càlculs de cada un d'aquests pressupostos i el càlcul del pressupost total, sent aquest de 30.278,32 €

	Concepte	Preu/hora	Temps	Total
enginyeria	Salari	15 €/h	660 h	9.900 €
	<b>Total</b>			<b>9.900 €</b>

Taula 8.1. Pressupost d'enginyeria

	Concepte	Preu adquisició (per un any)	Temps llogat	Total
Software	MS OFFICE	70 €	1 any	23 €
	ANSYS FLUENT	26.400 €	1 any	8.800 €
	SOLIDWORKS	18.600 €	1 any	6.200 €
	<b>Total</b>			<b>15.023 €</b>

Taula 8.2. Pressupost de Software

	Concepte	Potencia	Temps d'us	Preu unitari	Total
Consum elèctric	Ordenador	0,09 kW	710 h	0,15 €/kWh	9,60 €
	<b>Total</b>				<b>9,60 €</b>

Taula 8.3. Pressupost de consum elèctric

	Concepte	Total
Costos totals	Cost total	24.932,60 €
	IVA	5.235,72 €
	<b>Total després d'impostos</b>	<b>30.168,32</b>

Taula 8.4. Pressupost total amb iva

	Concepte	Preu adquisició	Coeficient amortització	Total
Amortització	Ordenador portàtil	1.100 €	0,1	110 €
	<b>Total</b>			<b>110 €</b>

Taula 8.5. Pressupost de les amortitzacions

<b>Cost total del projecte</b>	<b>30.278,32</b>
--------------------------------	------------------

Taula 8.6. Cost total del projecte

## 9. Estudi d'impacte ambiental

Degut que aquest és un projecte totalment teòric, no es necessita un estudi mediambiental molt complert, ja que tot l'estudi s'ha realitzat mitjançant un ordinador portàtil. Tot i això, s'ha de ressaltar un parell d'aspectes de caràcter mediambiental derivats de la realització d'aquest projecte. El fet d'haver empleat una gran quantitat d'hores amb un ordinador funcionant, fins i tot per la nit quan es feien els estudis de CFD, implica un consum d'energia elèctrica no menyspreable. Tenint en compte que a l'estat espanyol la majoria de fonts d'energia no provenen d'instal·lacions renovables, fa encara més important la feina de reducció de temps de processat usant tècniques com els estudis de sensibilitat del mallat.

D'altra banda, la realització d'un projecte d'aquest estil també té efectes positius en el medi ambient. Quan es fa un estudi de CFD pel disseny d'un nou vehicle, implica que s'hauran de crear menys prototips per demostrar coses que es poden veure en les simulacions. Aquests prototips no hauran de ser fabricats, que això ja implica un cost de matèria prima i energia, ni tampoc hauran de ser reciclats o llançats a un abocador.

Un altre avantatge en un estudi com aquest és que es redueixen en gran mesura les hores de proves en túnels de vent, ja que té un cost d'energia molt superior a la gastada en total en fer simulacions per ordinador. Finalment, això també suposa menys quilometres recorreguts en una pista de proves per obtenir el disseny final. Evitar totes aquestes proves suposa també una disminució de la contaminació de gasos d'efecte hivernacle degut al consum de benzina i de desgast de materials del vehicle (com les rodes).



*Figura 9.1. Desenvolupament sostenible*



## Conclusions

---

Amb la realització del projecte s'han aconseguit superar satisfactòriament els diferents objectius plantejats. Per començar, s'ha complert el principal objectiu del projecte que és la posada en pràctica dels coneixements apresos en mecànica de fluids a l'àmbit de l'automoció. Per a això, s'ha realitzat una simulació inicial per poder comprovar amb els estudis teòrics i fer una primera valoració del comportament del model. A partir d'aquí, s'han optat per fer diverses modificacions amb el fi d'explicar el que està exposat a la memòria a un cas pràctic, canviant zones com el para-xocs, els parabrises, la geometria del maleter i afegint altres elements que milloren la aerodinàmica del vehicle. Amb aquestes modificacions s'ha arribat a aconseguir des de reduccions properes al 1% al coeficient de resistència al avanç fins a reduccions del 25% en l'últim cas. Però no només s'ha aconseguit reduir aquest coeficient, sinó que també s'ha reduït el coeficient de sustentació fins a valors del 57%.

El segon objectiu més important que s'ha complert és el de conèixer i entendre com funcionen els diferents elements que configuren un turisme i el perquè de les seves formes i dimensions. Per a això, s'ha fet un estudi exhaustiu de la influència de cada element i com pot ser la variació al modificar uns angles o arrodonir unes superfícies.

Per últim, també s'ha complert l'objectiu secundari de familiaritzar-se amb els programes necessaris per tal de crear una geometria CAD en 3D partint des de zero i anar aplicant canvis i modificacions fins que el model és el més aproximat possible a la realitat. Per a això, s'ha repassat el funcionament del programa SOLIDWORKS 2015 que es va aprendre al primer any de carrera i s'ha millorat la creativitat i velocitat de treball amb aquesta eina. En segon lloc, també s'ha complert l'objectiu de familiaritzar-se amb el programa de CFD ja que és on s'apliquen tots els fonaments de la mecànica de fluids per la resolució de problemes complexos. El programa que s'ha utilitzat és el de ANSYS FLUENT 16.2 i s'ha après a treballar i crear un bon mallat per aconseguir uns resultats fiables.

Un cop realitzat l'estudi presentat en aquest projecte, el següent pas seria continuar provant el vehicle amb un estudi en un túnel de vent, per poder així, validar els resultats obtinguts amb la simulació numèrica. El avantatge de fer la simulació numèrica al principi, tal i com ja s'ha comentat a la memòria, és que la empresa estalviï diners en proves innecessàries creant models a gran escala per provar-lo moltes hores en un túnel de vent per arribar als mateixos resultats.

Per acabar, després de l'estudi realitzat, es podrien provar diferents geometries de cada element modificat, ja que actualment hi ha moltes variacions possibles i cada variació pot aportar un valor diferent als coeficients aerodinàmics. Per exemple, al fer la primera modificació, es podria haver arrodonit el morro d'una manera diferent, o també es podria arrodonir encara més la part posterior. D'altra banda, també es podria arribar a un model amb una geometria més realista per la venda en sèrie a un mercat real.

Millores aerodinàmiques en un turisme antic

## Agraïments

---

En primer lloc, m'agradaria agrair al professor Enric Trillas per acceptar la tutoria d'aquest projecte i a la professora Carme Valero pels seus breus però útils consells sobre el programa FLUENT.

M'agradaria donar les gràcies a la meva mare que m'ha donat suport durant tota l'etapa del treball i agrair a la Cristina Pueyo pels seus consells que han sigut de gran ajuda. També he d'agrair al meu amic Oriol Crespo i al seu pare Daniel Crespo per ajudar-me quan més ho he necessitat.

Finalment, vull agrair a tot l'equip de Motostudent de l'ETSEIB, al Jaume Conill i Carlos Picó per ajudar-me en un mal moment, quan em va deixar de funcionar la meva llicència de FLUENT, i em van deixar simular durant unes setmanes en un ordinador del seu despatx.

## Bibliografia

---

- [1] THOMAS D. GILLESPIE, *Fundamental of Vehicle Dynamics*.
- [2] JULIAN HAPPIAN-SMITH, *Introduction to Modern Vehicle Design*, 2001.
- [3] GIANCARLO GENTA, *Motor Vehicle Dynamics: Modeling and Simulation*, 2008.
- [4] F. M. White, *Mecánica de Fluidos*, McGraw-Hill, 2004
- [5] JOSÉ MESEGUER, *Algunas Consideraciones Sobre la Aerodinámica de los Automóviles de Carreras*, X Conferencia Heraclio Alfaro, Vitoria. Noviembre 2010.
- [6] D. LANDMAN, *Flow Field Features and Aerodynamic Drag of Passenger Cars*, Old Dominion University
- [7] DGT (Dirección General de Tráfico), *La Revista*, setembre-octubre 2002.  
Disponible a:  
<<http://www.dgt.es/revista/archivo/pdf/num156-2002-dossier.pdf>>
- [8] Mohammed Bappa & Sajid Abdullah, *Aerodynamic Simulation of Vehicle Bodywork Design*, Teeside University, 2015.  
Disponible a:  
<<http://www.slideshare.net/MohammedBappa/aerodynamic-simulation-of-vehicle-bodywork-design>>
- [9] Ryan Carlyle (Subsea Hydraulics Engineer), *How much downward force does a spoiler produce, and is it significant enough to make a positive impact on acceleration?*.  
Disponible a:  
<<https://www.quora.com/How-much-downward-force-does-a-spoiler-produce-and-is-it-significant-enough-to-make-a-positive-impact-on-acceleration>>
- [10] Build Your Own Race Car, *Resources for the amateur car designer and Builder*.  
Disponible a:  
<<http://www.buildyourownracecar.com/race-car-aerodynamics-basics-and-design/>>
- [11] CFD Online.  
Disponible a:  
<<http://www.cfd-online.com/>>

- [12] TAMÁS LAJOS, *Basics of vehicle aerodynamics*, University of Rome “La Sapienza”, 2002.
  
- [13] ANDRÉ BAKKER, *Course Material and Lectures: 1, 4, 5, 6, 7 i 10*.  
Disponible a:  
< <http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/> >
  
- [14] E. TRILLAS, *Mecànica de Fluids: Apunts de l'assignatura*, Barcelona ETSEIB.

## Annex

En aquest apartat es mostren més figures sobre els resultats de les simulacions estudiades a la memòria per poder ratificar el que s'ha comentat als apartats 6 i 7. Es mostren figures des de diferents vistes del volum de control on es representa el camp de pressions i camp de velocitats.

### A. Anàlisi complementari de resultats

#### A.1 Representació del camp de pressions

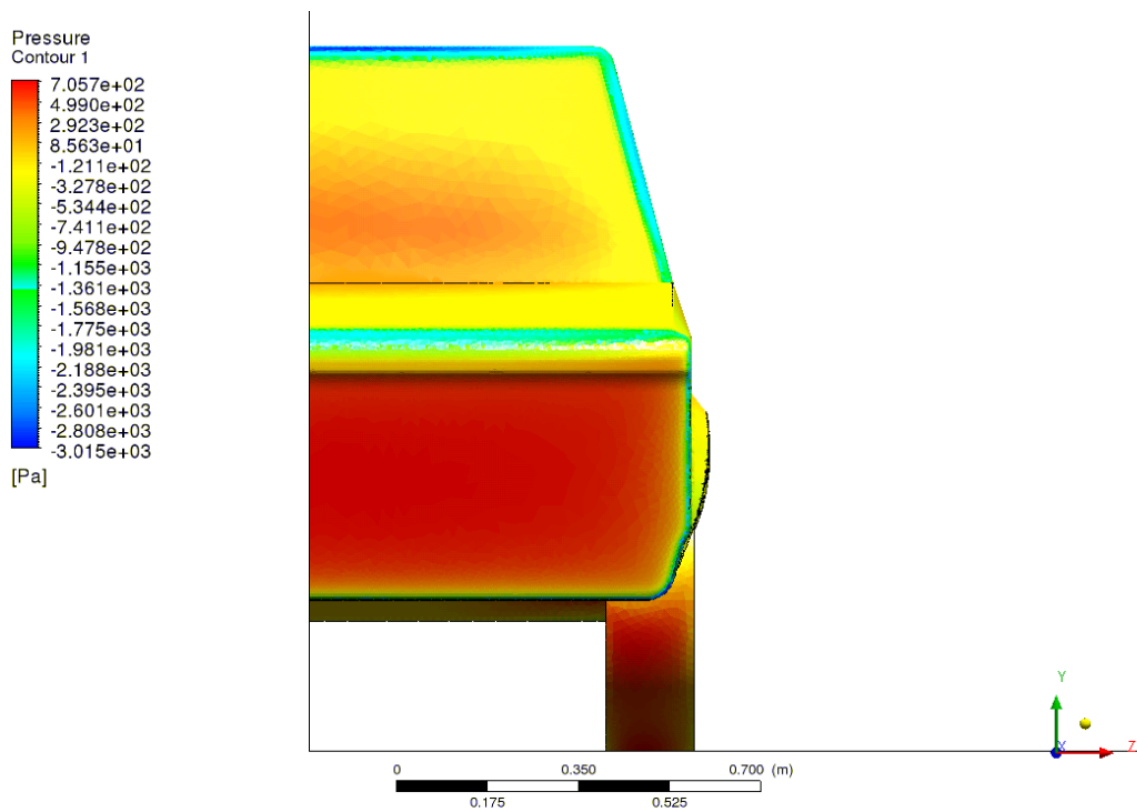


Figura A.1. Representació frontal del camp de pressions



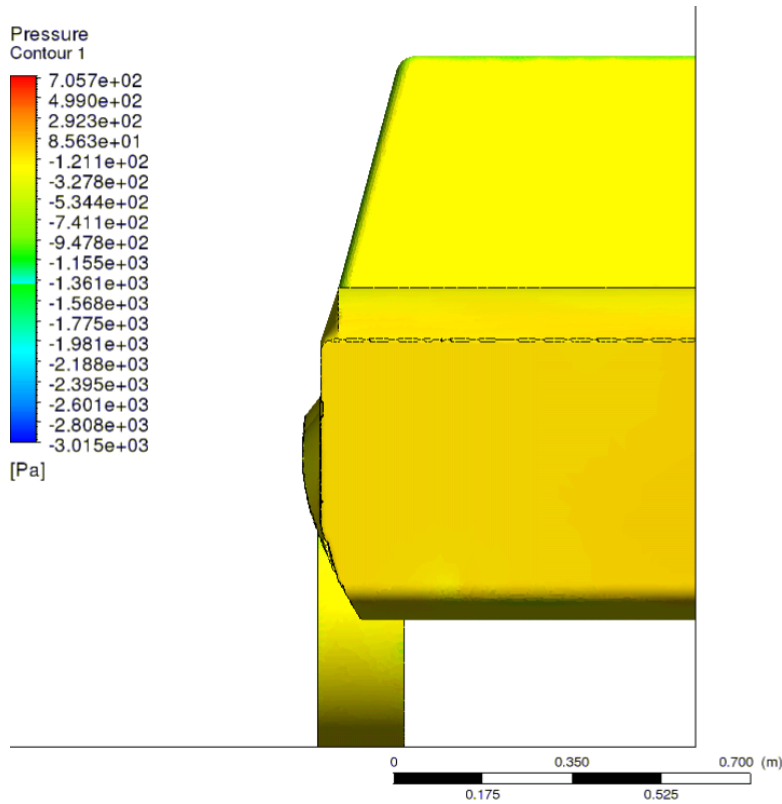


Figura A.2. Representació posterior del camp de pressions

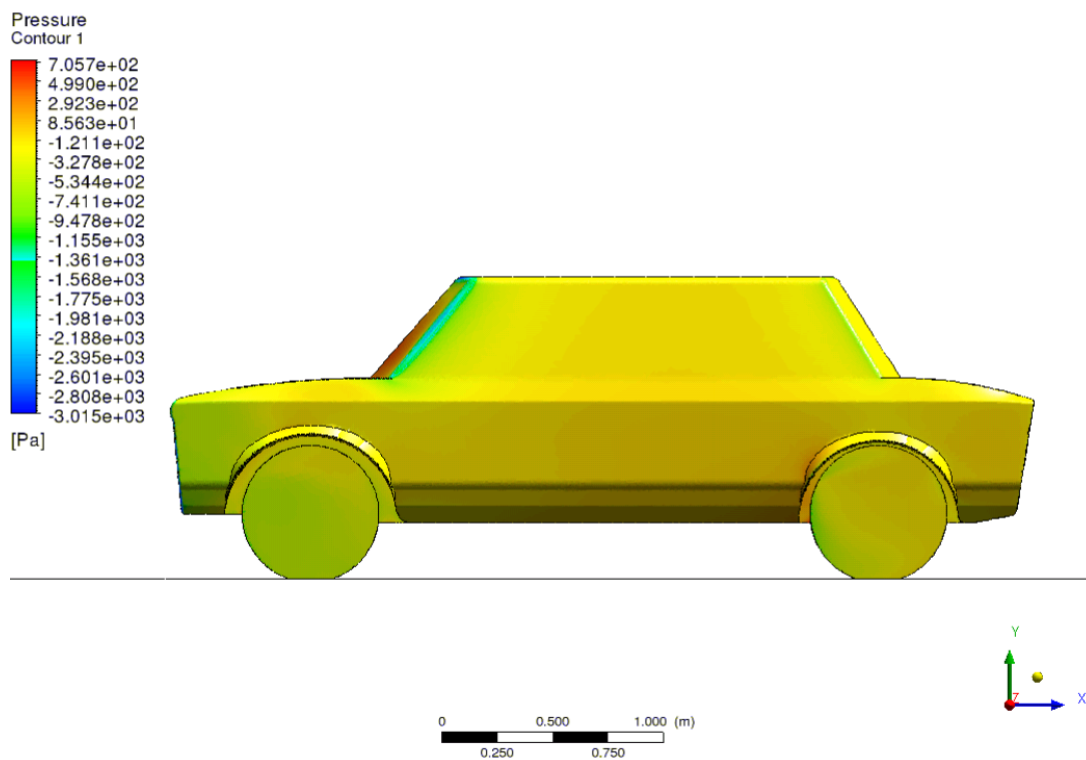


Figura A.3. Representació lateral del camp de pressions

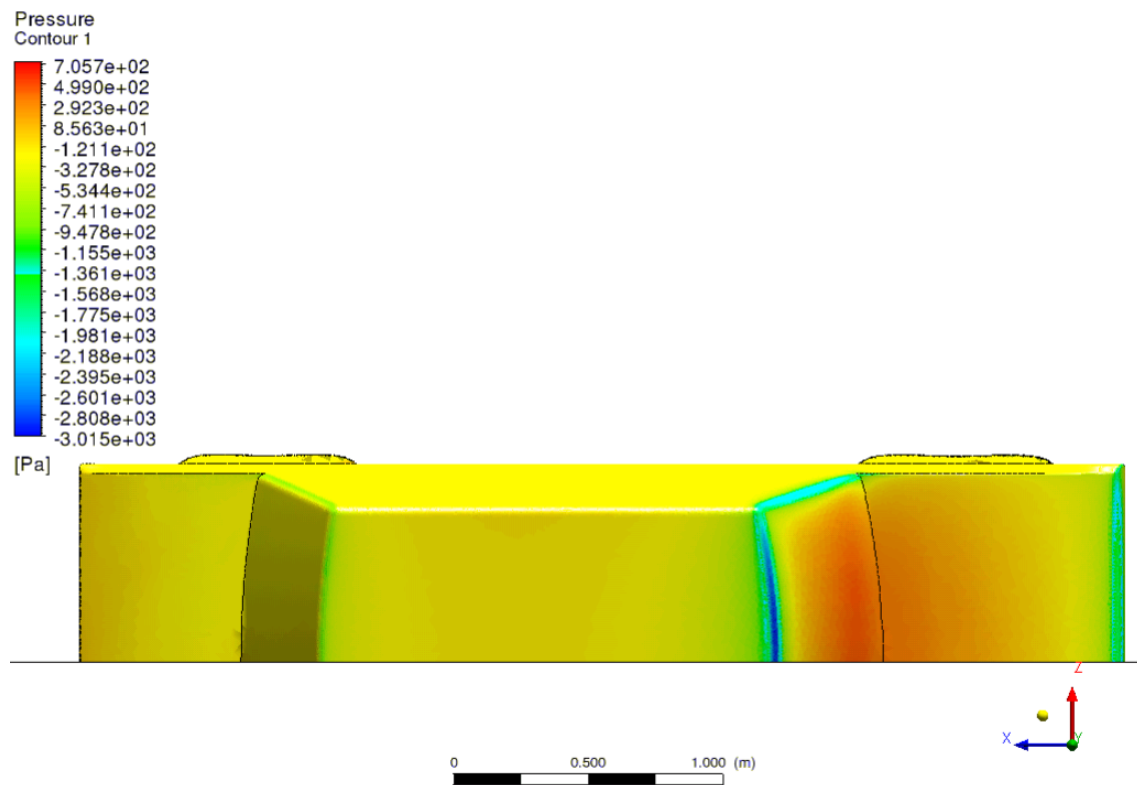


Figura A.4. Representació superior del camp de pressions

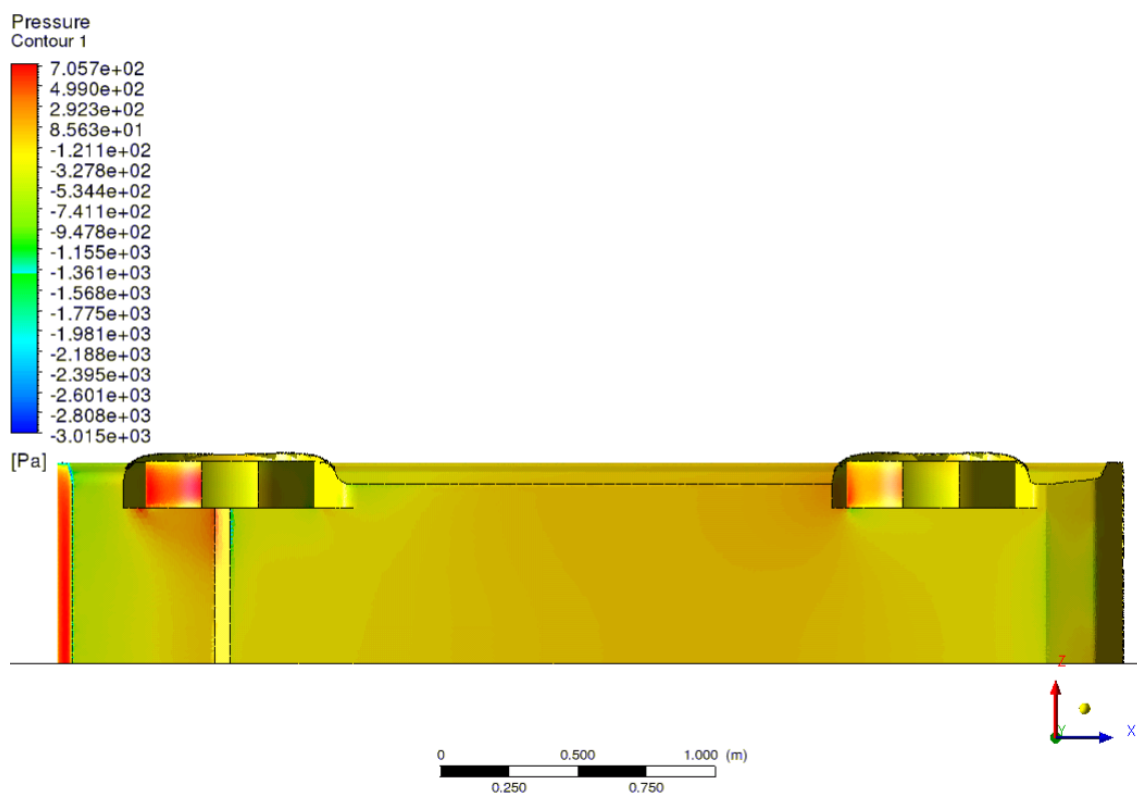


Figura A.5. Representació inferior del camp de pressions

## A.2 Representació del camp de velocitats

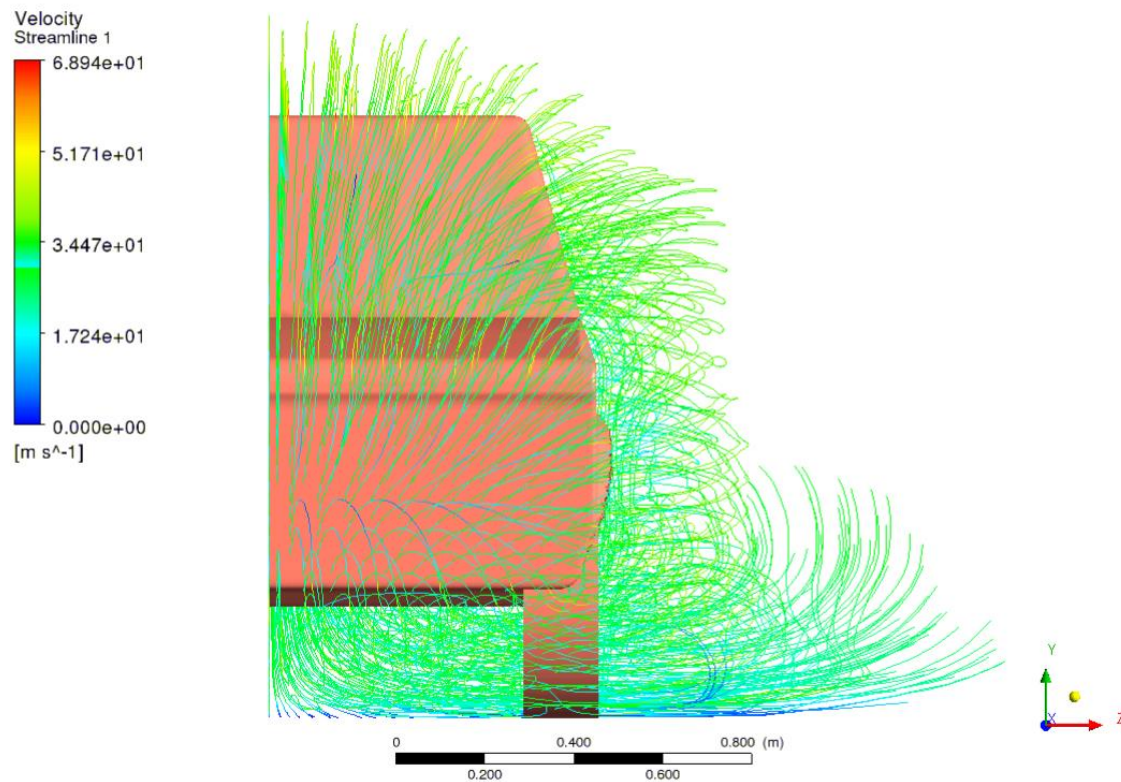


Figura A.6. Representació frontal del camp de velocitats

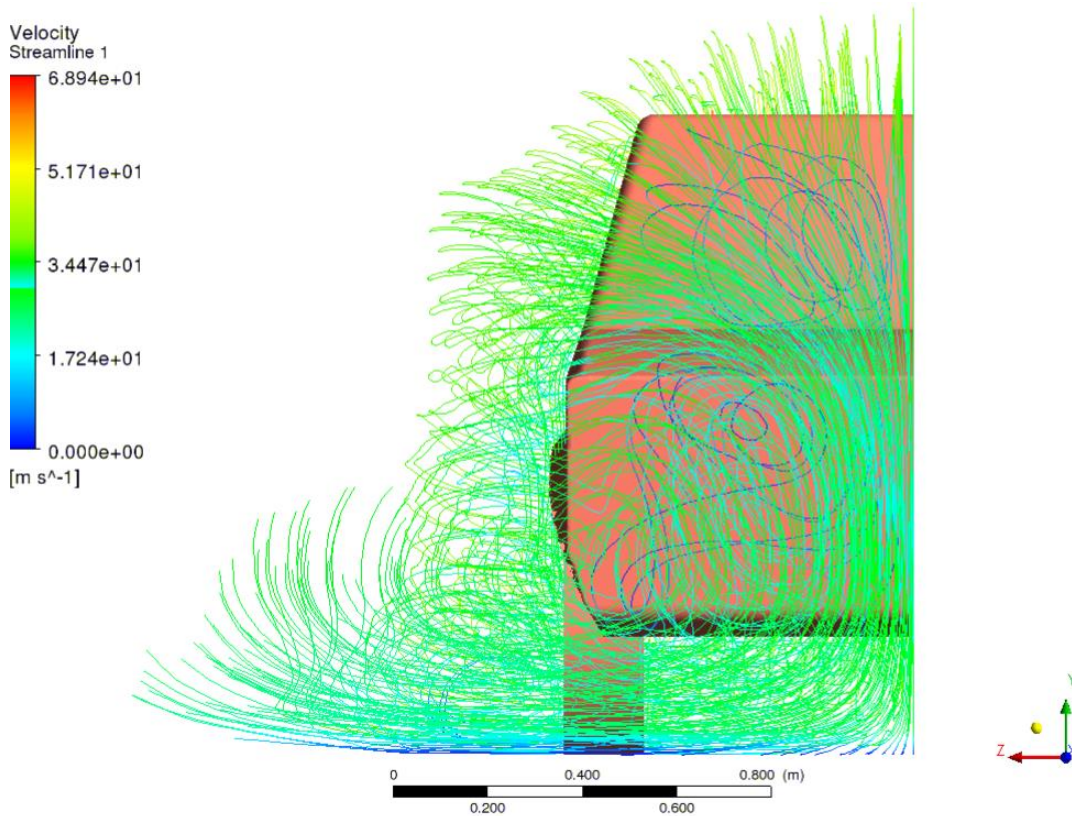


Figura A.7. Representació posterior del camp de velocitats

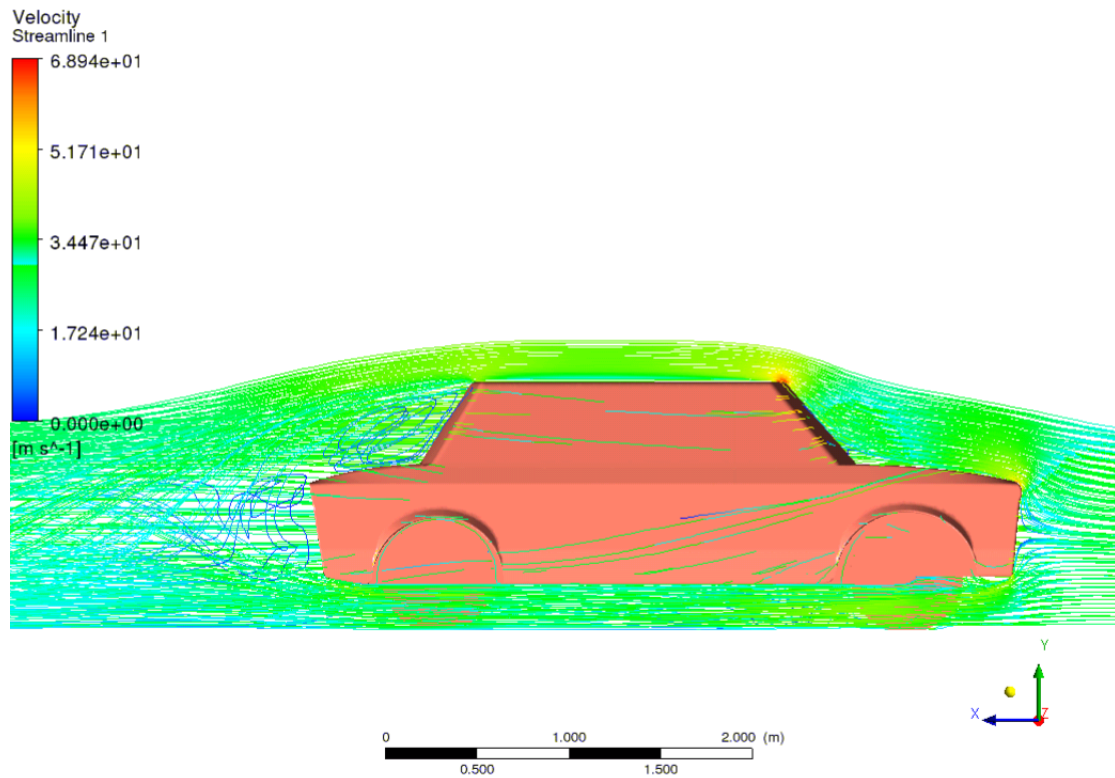


Figura A.8. Representació lateral del camp de velocitats

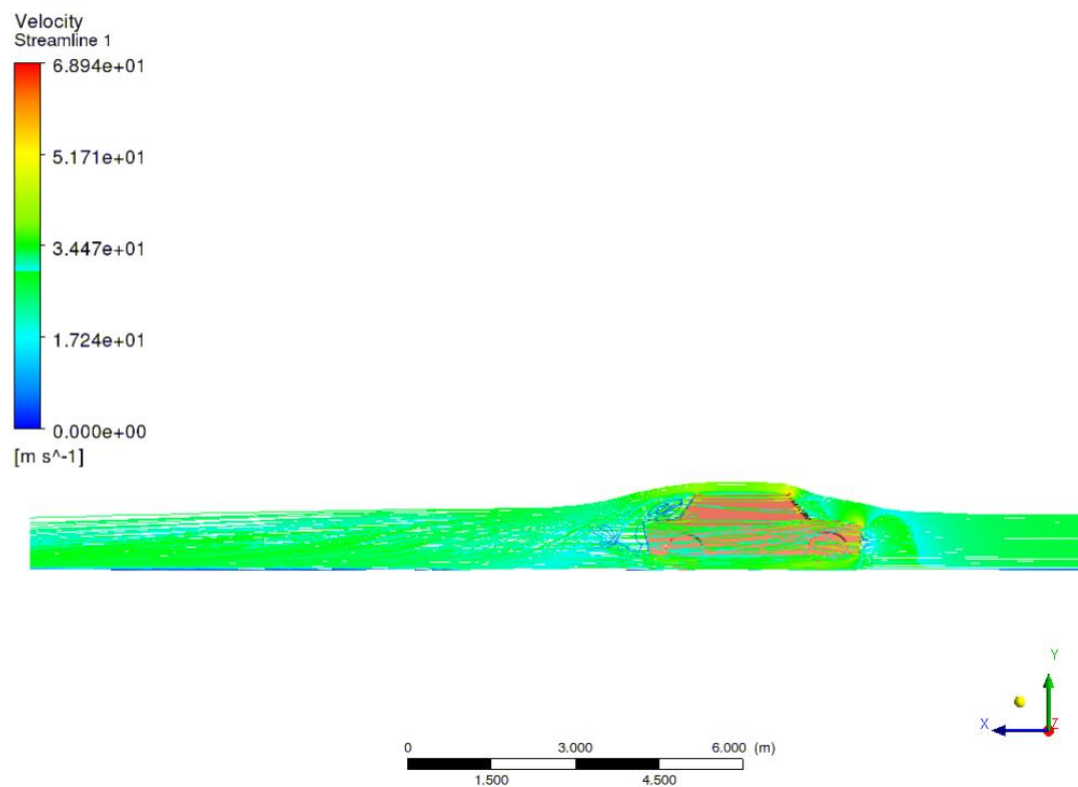


Figura A.9. Representació lateral del camp de velocitats

### A.3 Representació de la turbulència

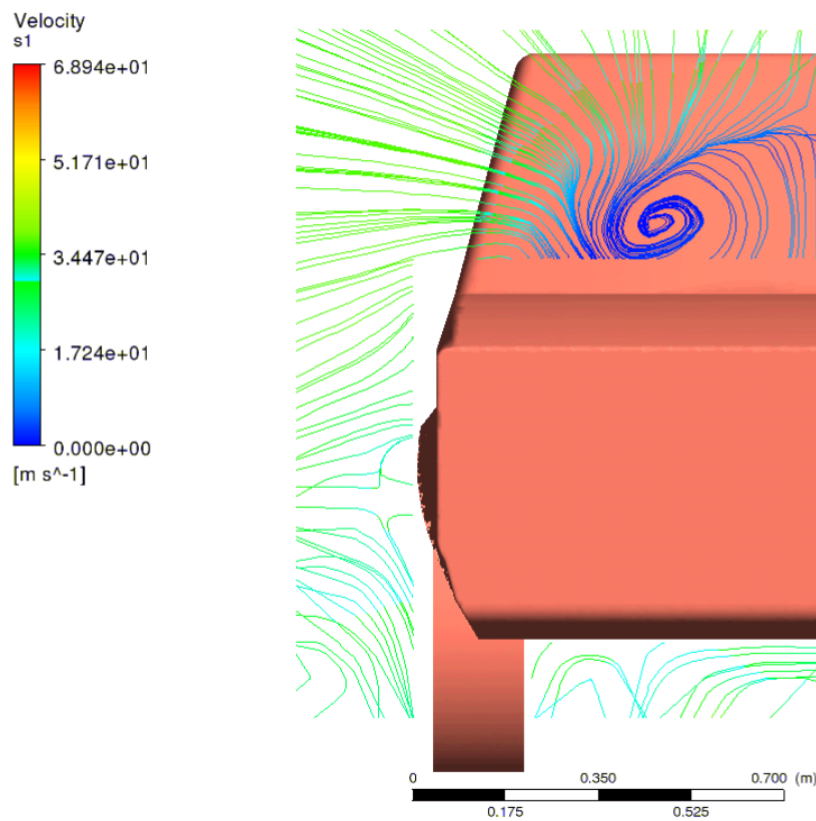


Figura A.10. Representació de les turbulències a la zona del maleter

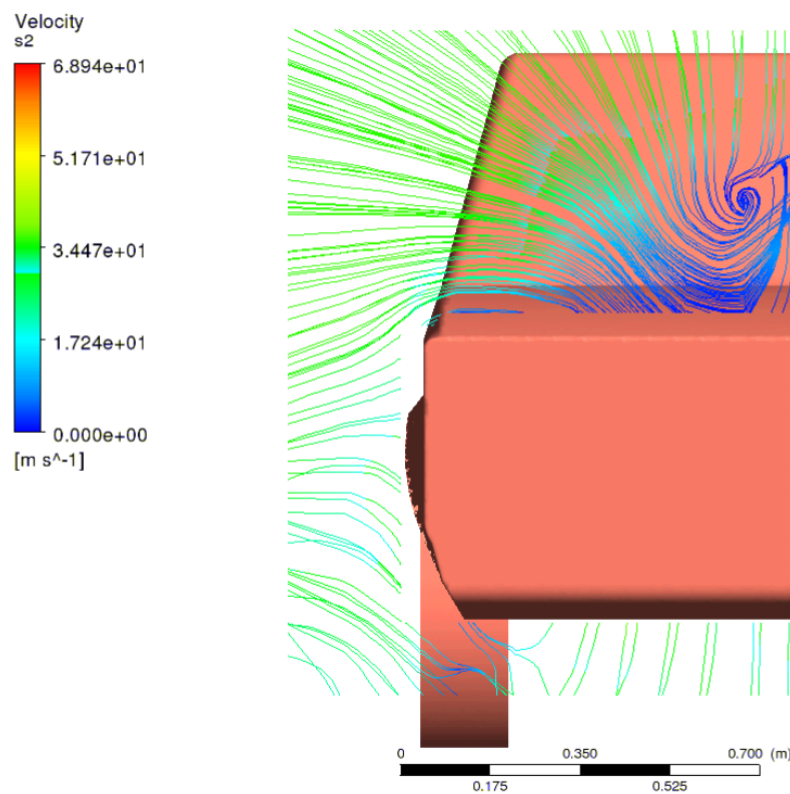


Figura A.11. Representació de les turbulències a la zona del maleter



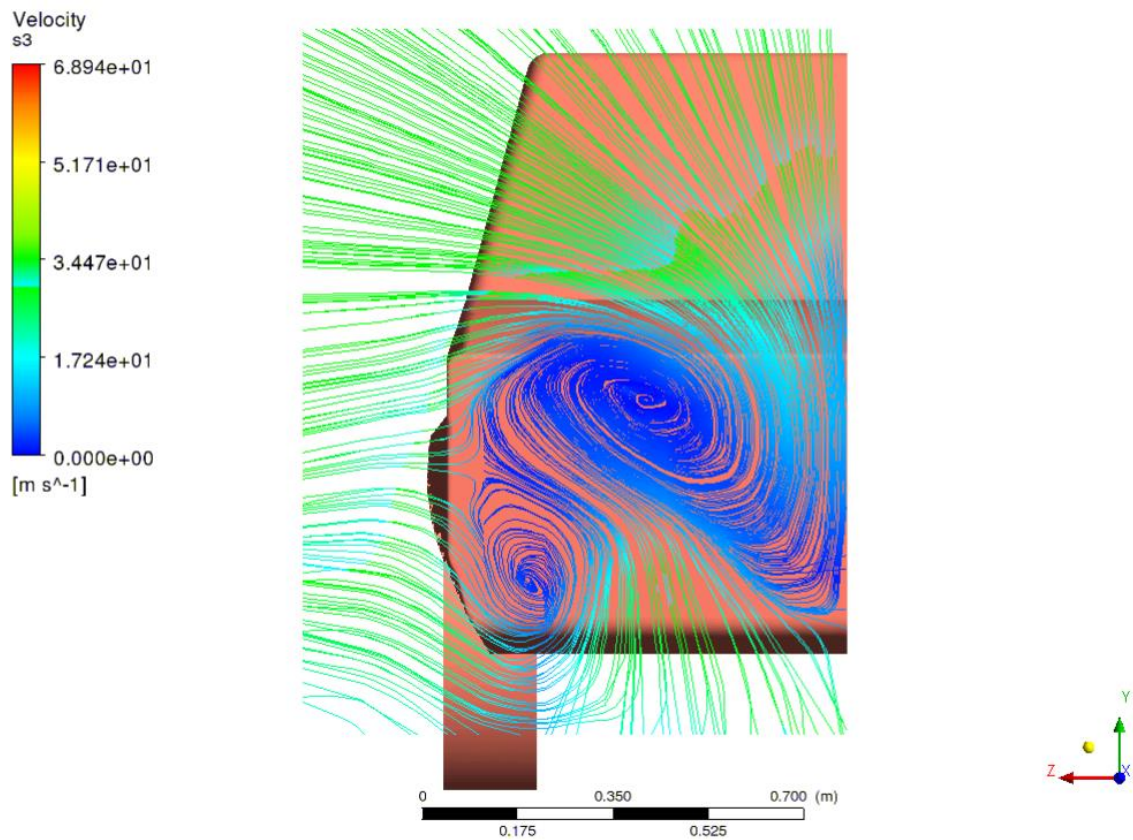


Figura A.12. Representació de les turbulències a 0.5m

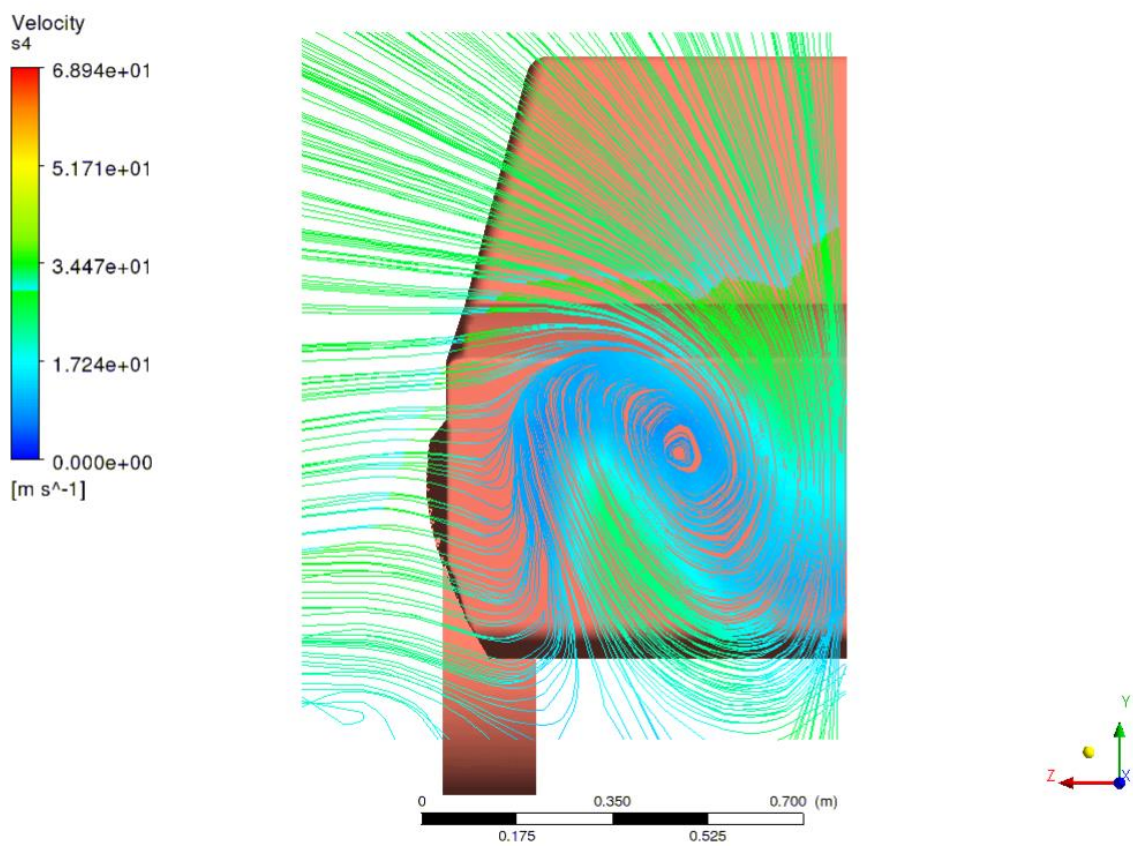


Figura A.13. Representació de les turbulències a 1m



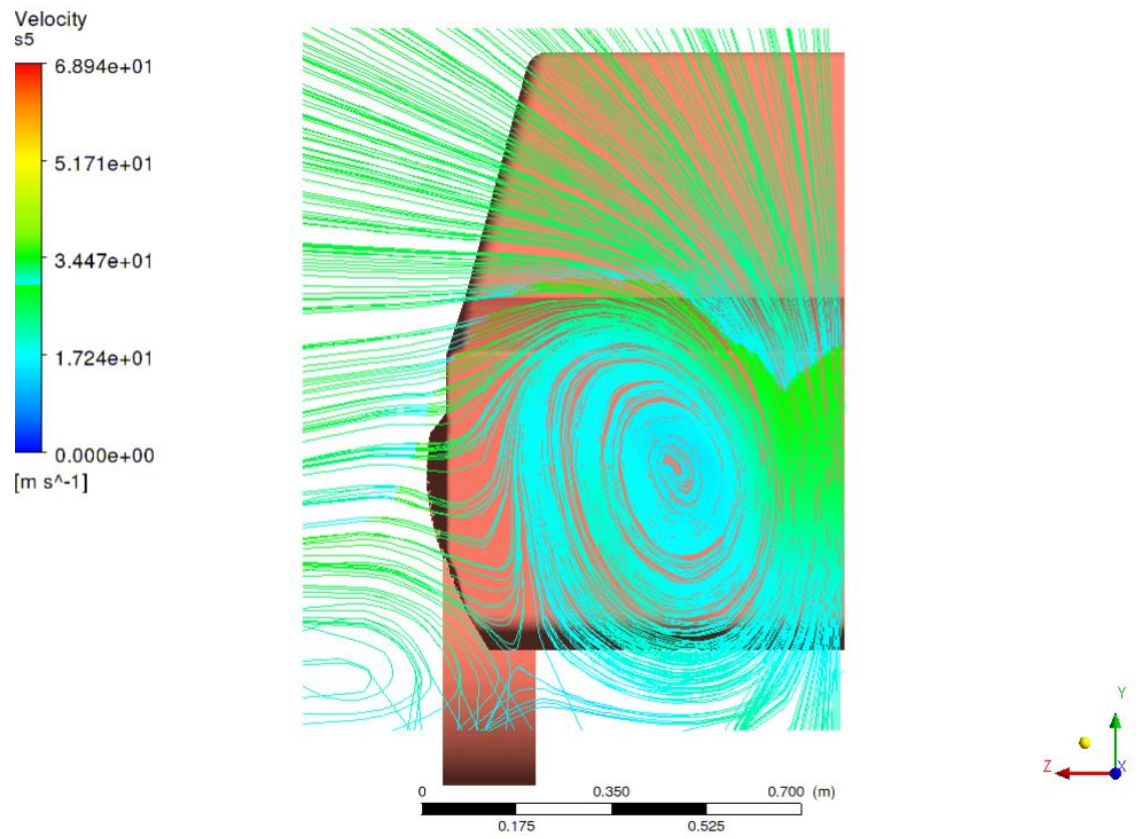


Figura A.14. Representació de les turbulències a 1.5m

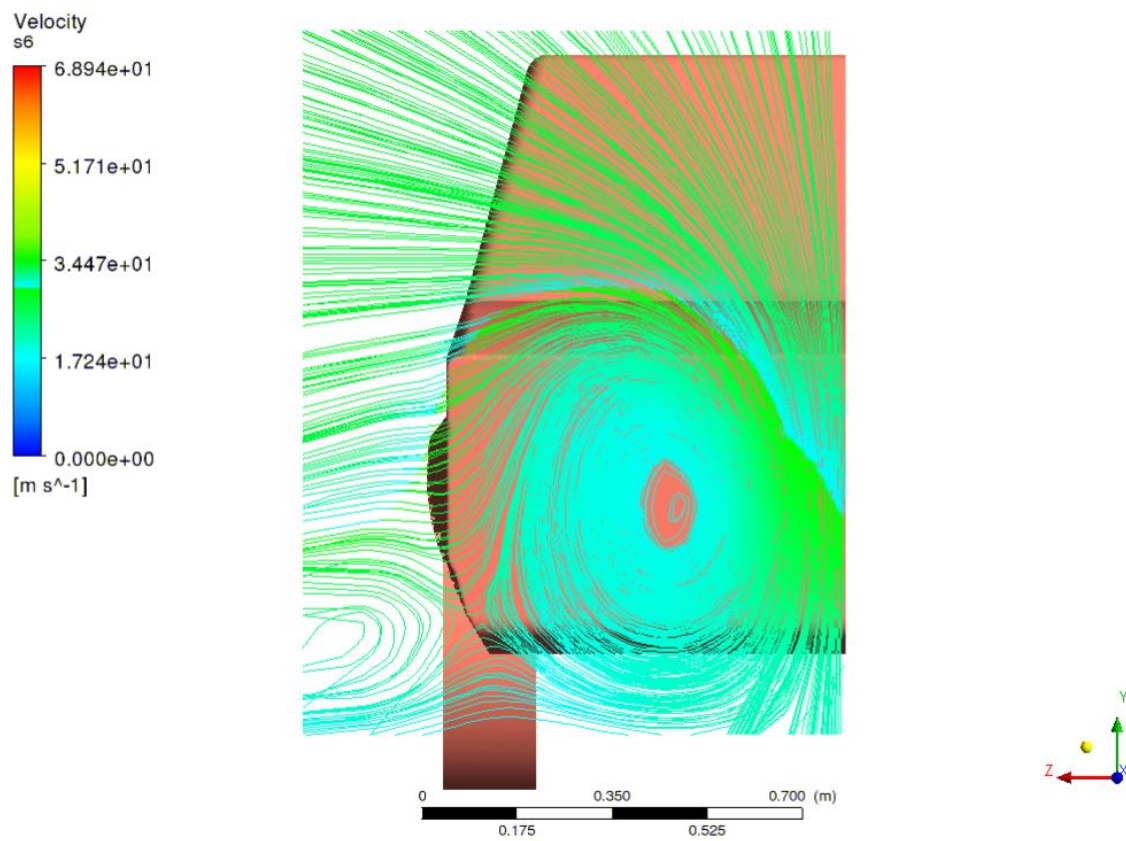


Figura A.15. Representació de les turbulències a 2m

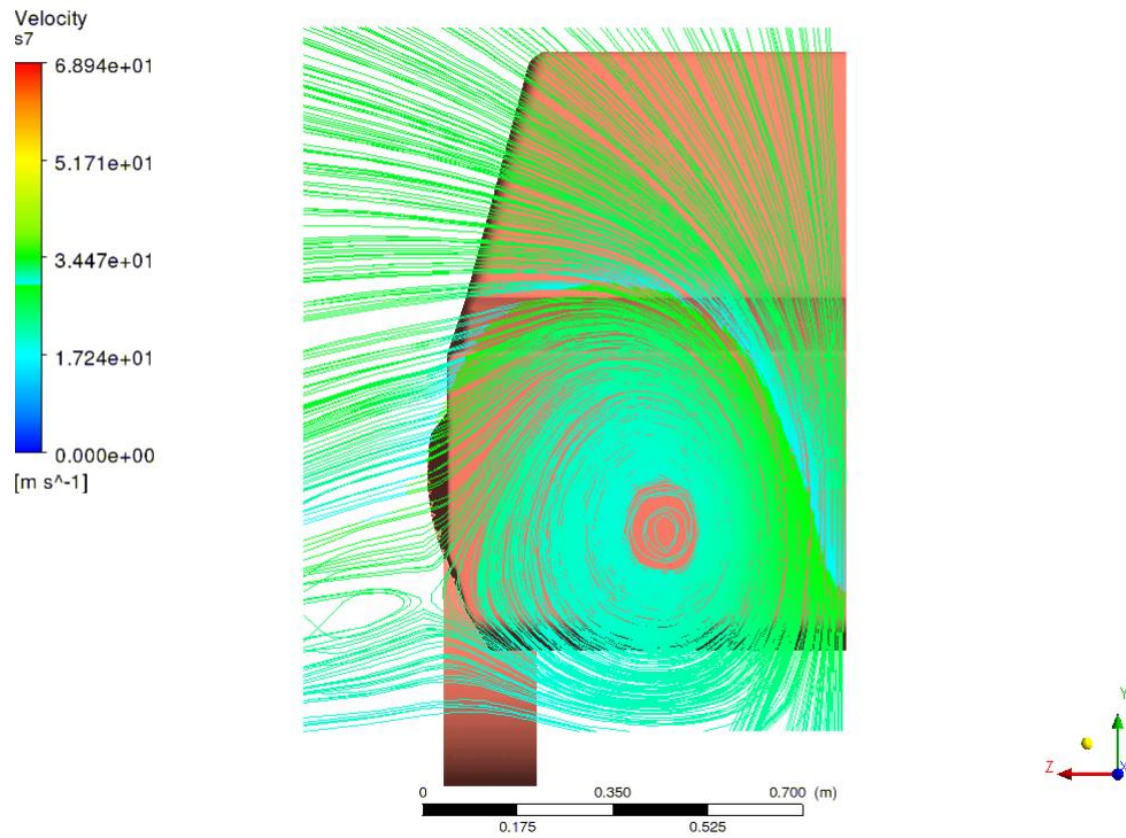


Figura A.16. Representació de les turbulències a 2.5m

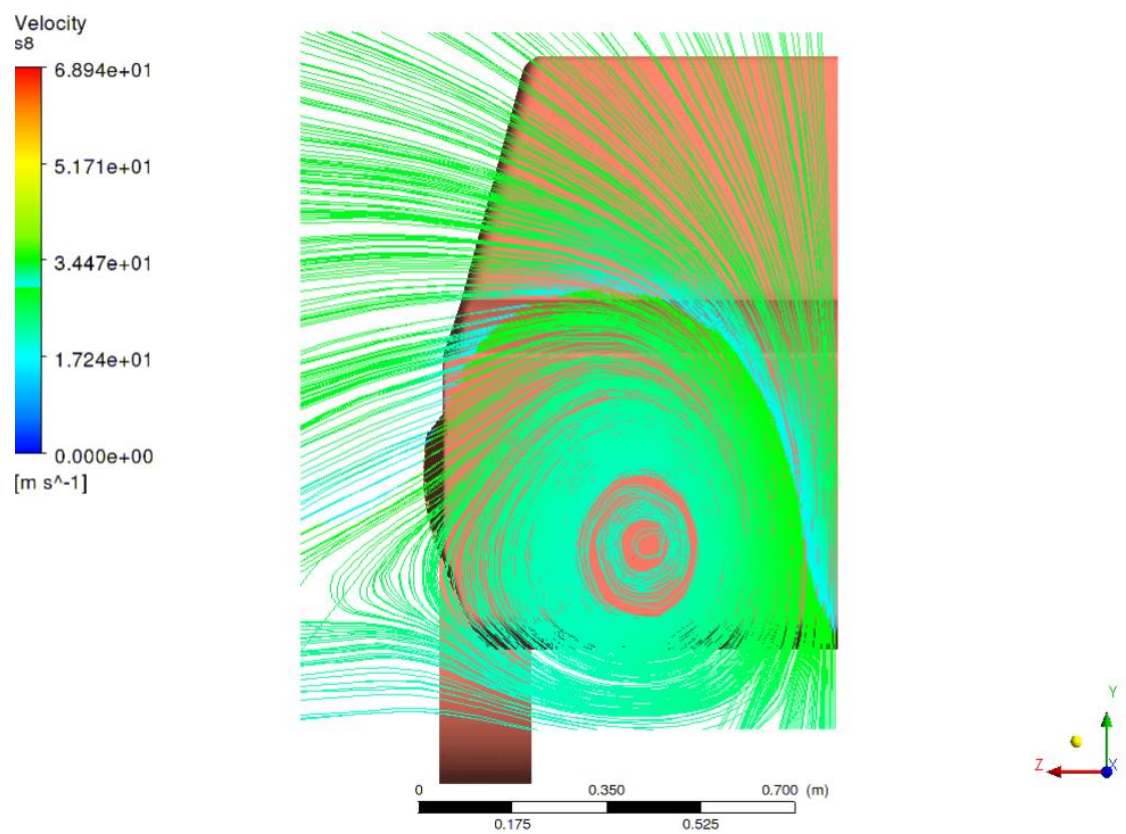


Figura A.17. Representació de les turbulències a 3m



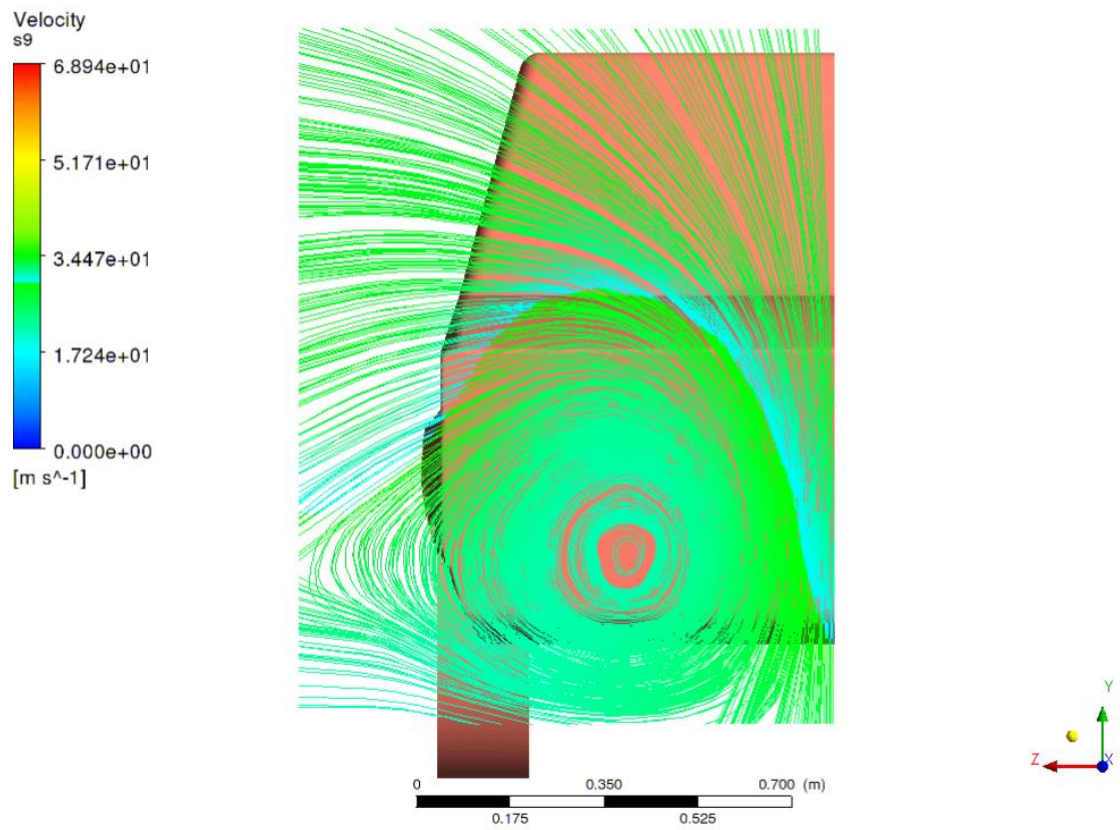


Figura A.18. Representació de les turbulències a 3.5m

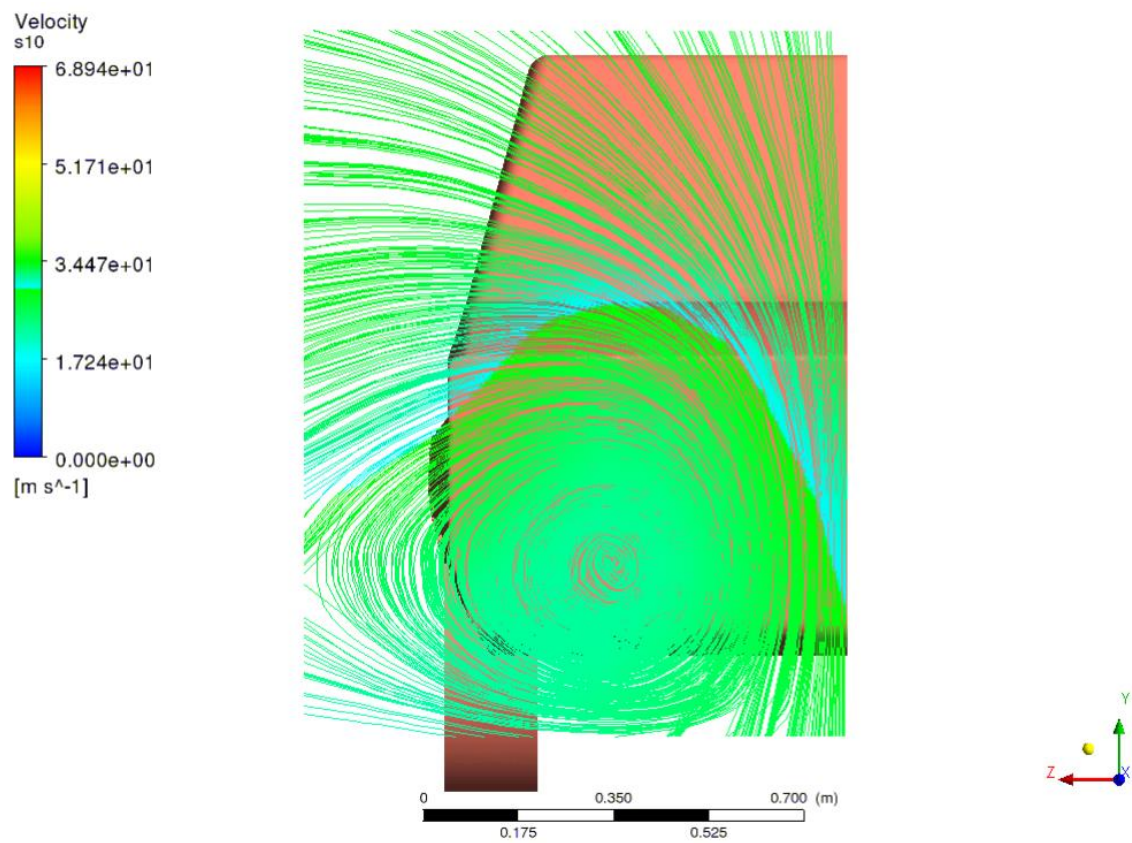


Figura A.19. Representació de les turbulències a 4m

## B. Primera modificació

### B.1 Gràfic de residus i coeficients monitoritzats

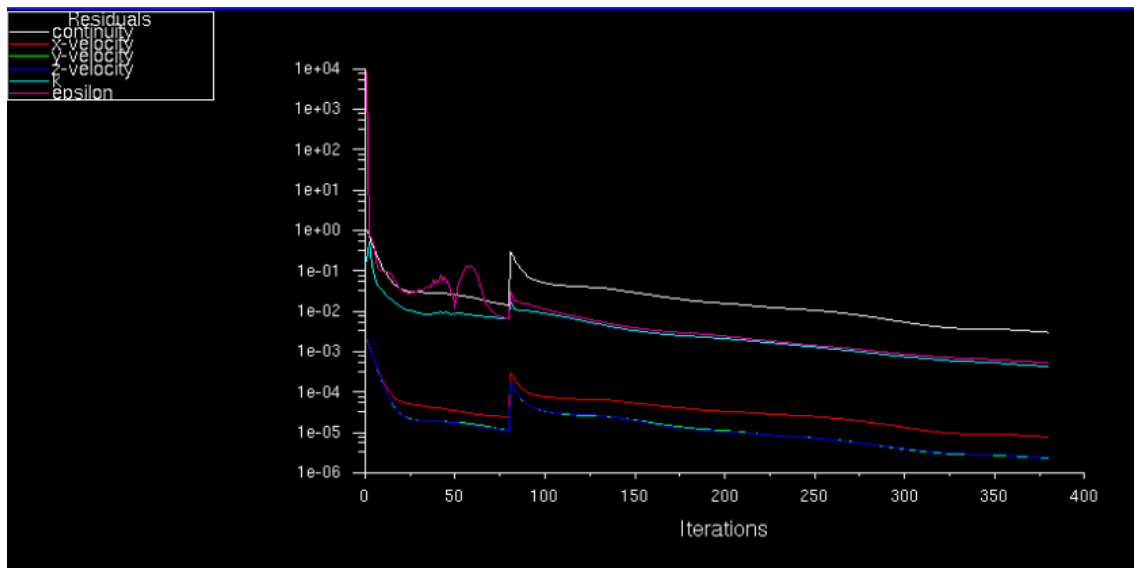


Figura B.1. Monitorització dels residus

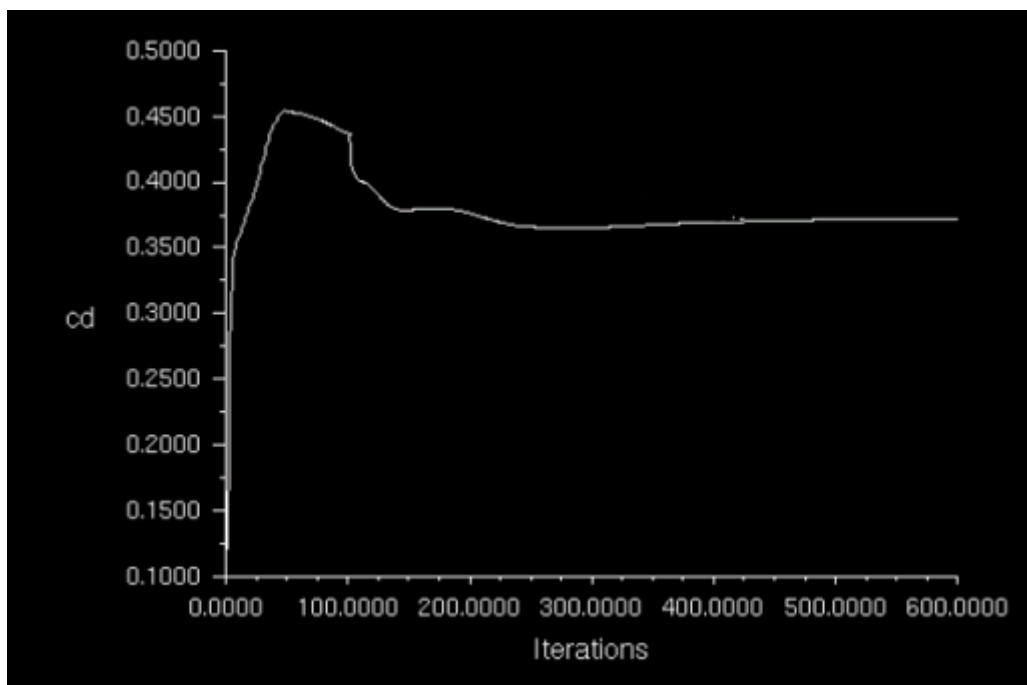


Figura B.2. Monitorització del coeficient de resistència al avanç

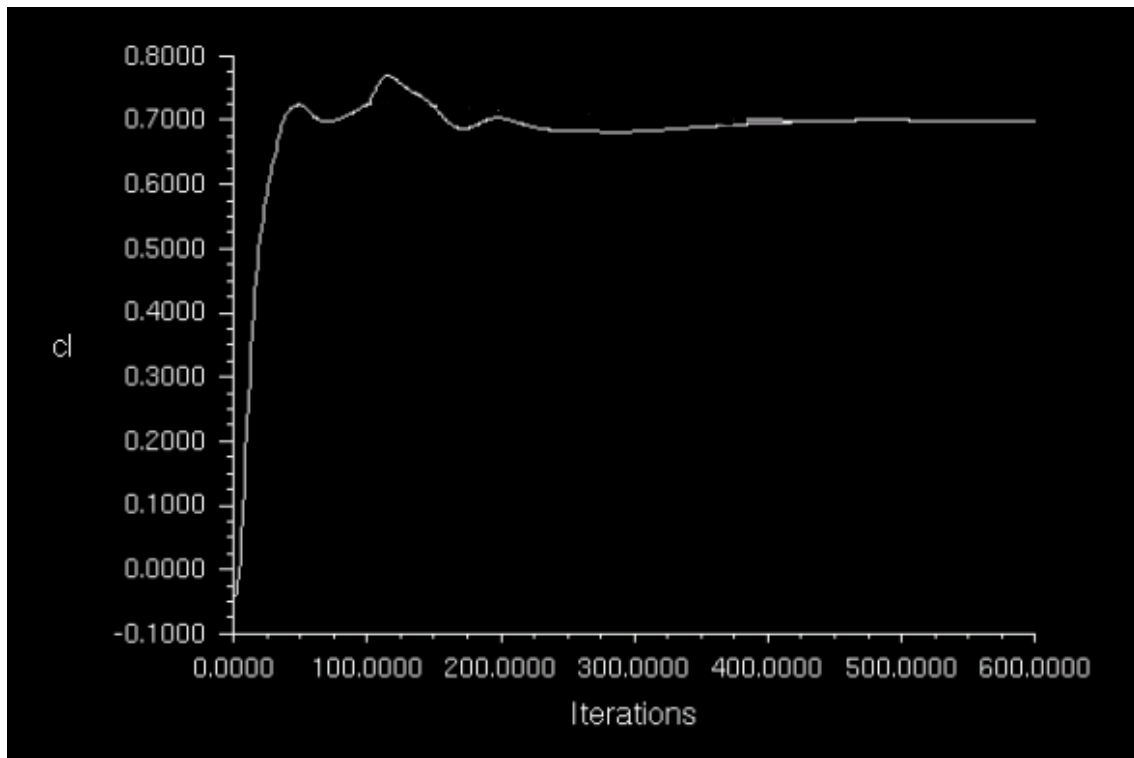


Figura B.3. Monitorització del coeficient de sustentació

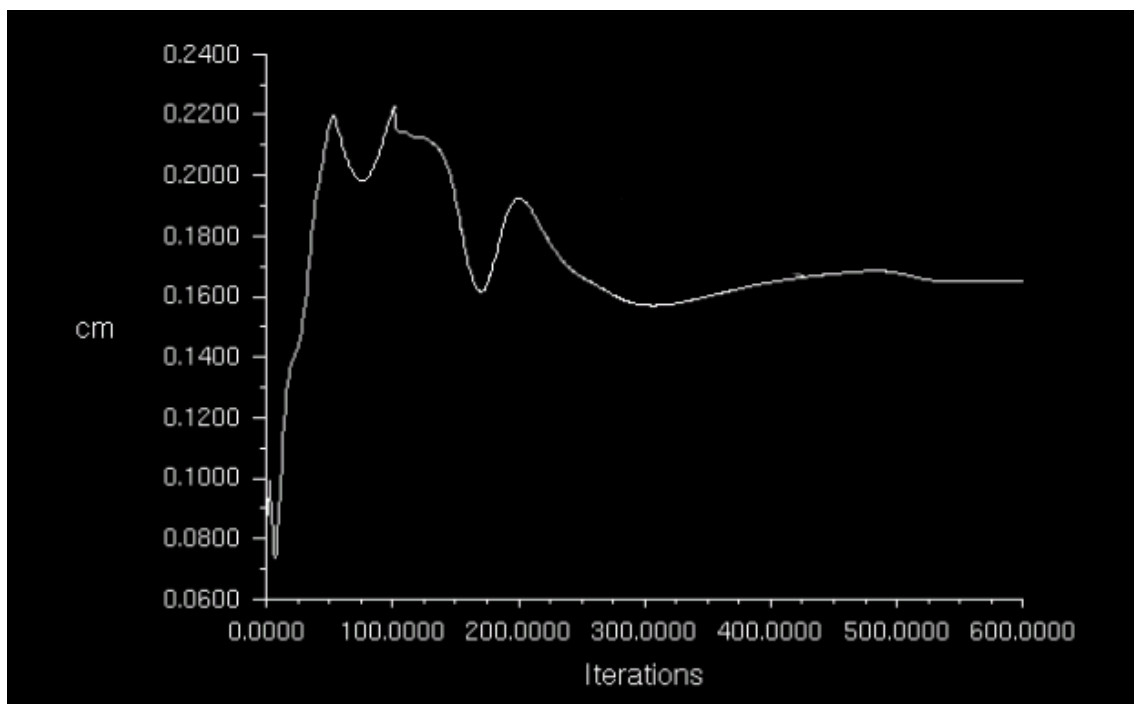


Figura B.4. Monitorització del coeficient del moment de capcineig

## B.2 Representació del camp de pressions

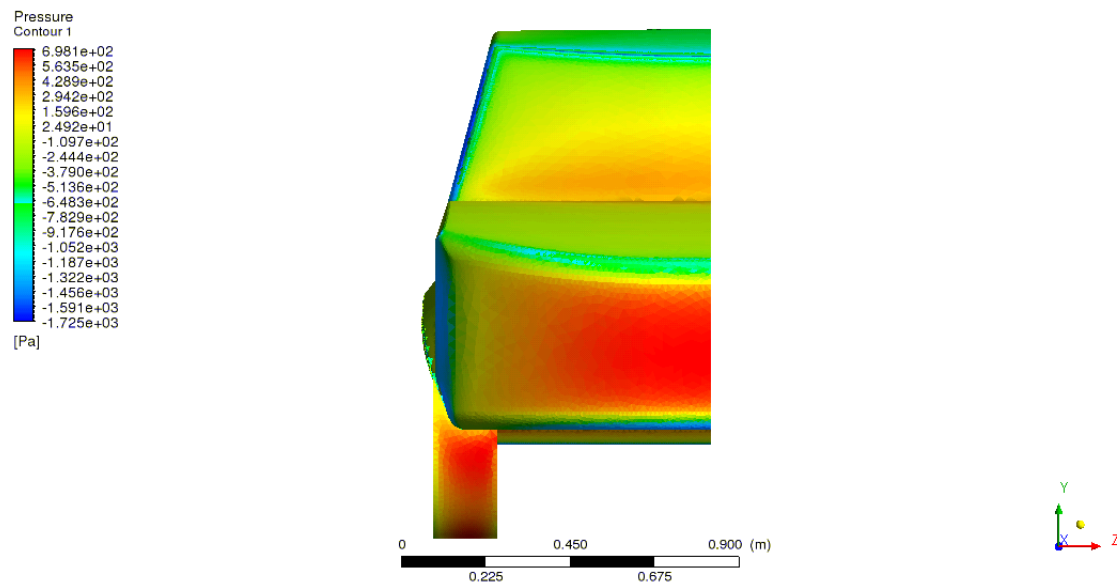


Figura B.4. Representació frontal del camp de pressions

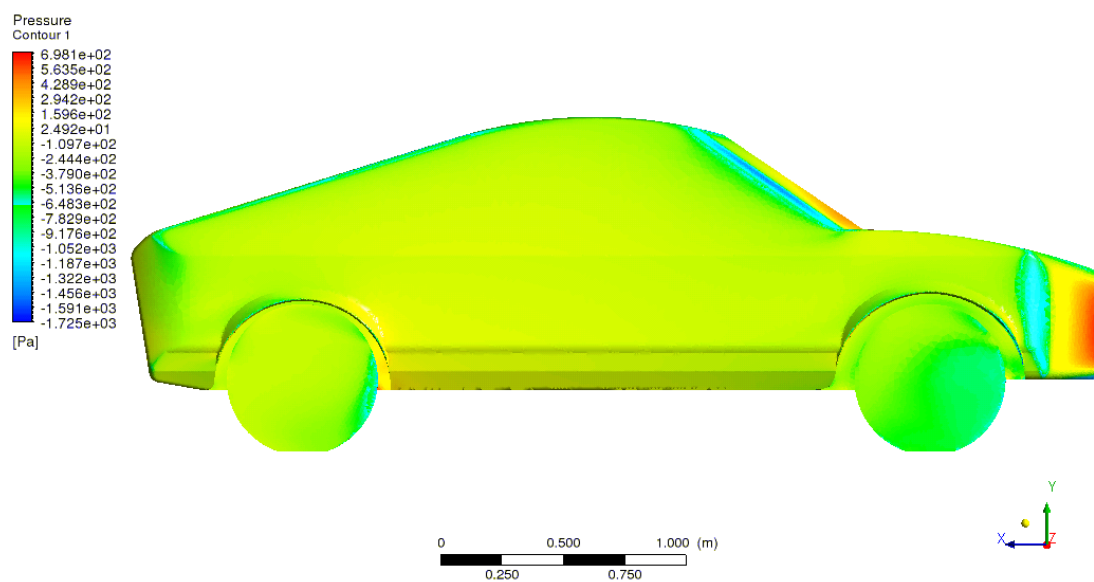


Figura B.5. Representació lateral del camp de pressions



### B.3 Representació del camp de velocitats

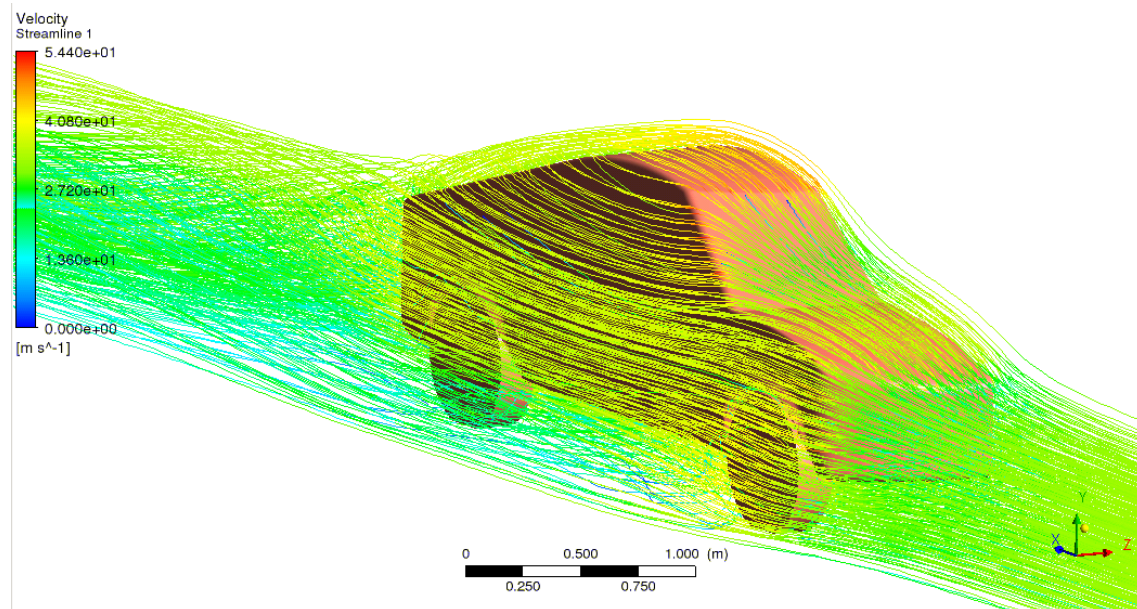


Figura B.6. Representació frontal del camp de velocitats

## C. Segona modificació

### C.1 Gràfic de residus i coeficients monitoritzats

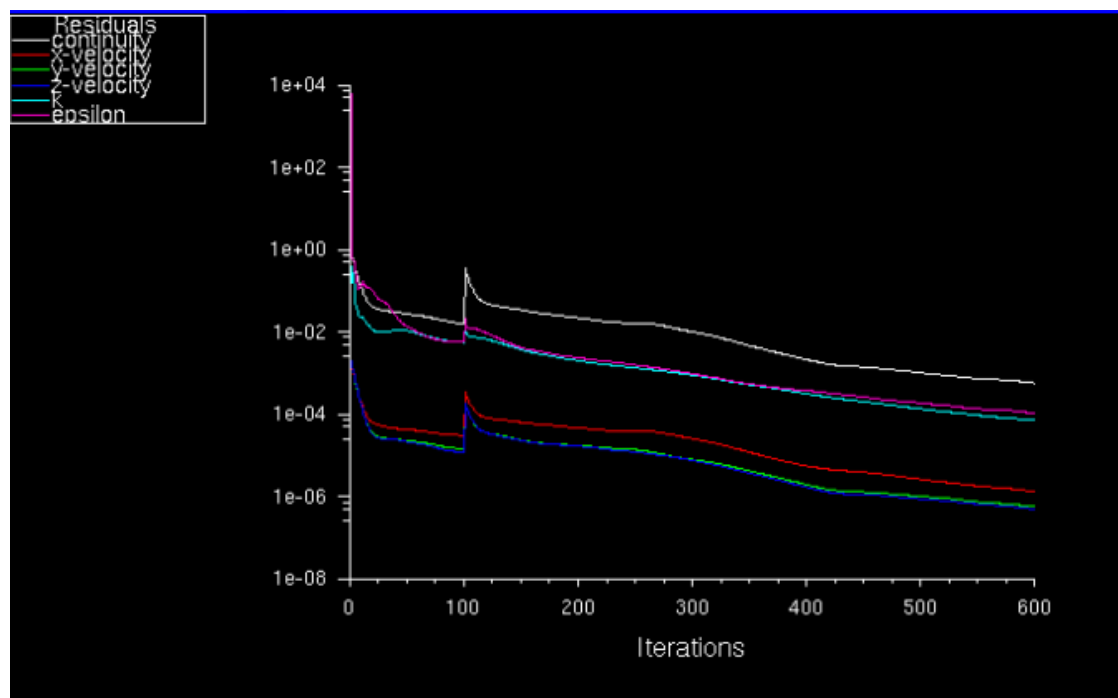


Figura C.1. Monitorització dels residus

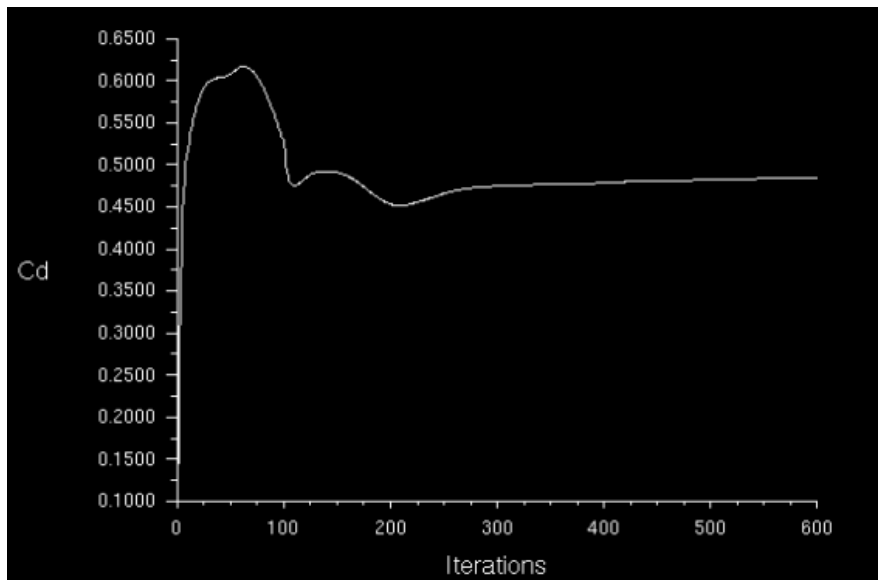


Figura C.2. Monitorització del coeficient de resistència al avanç

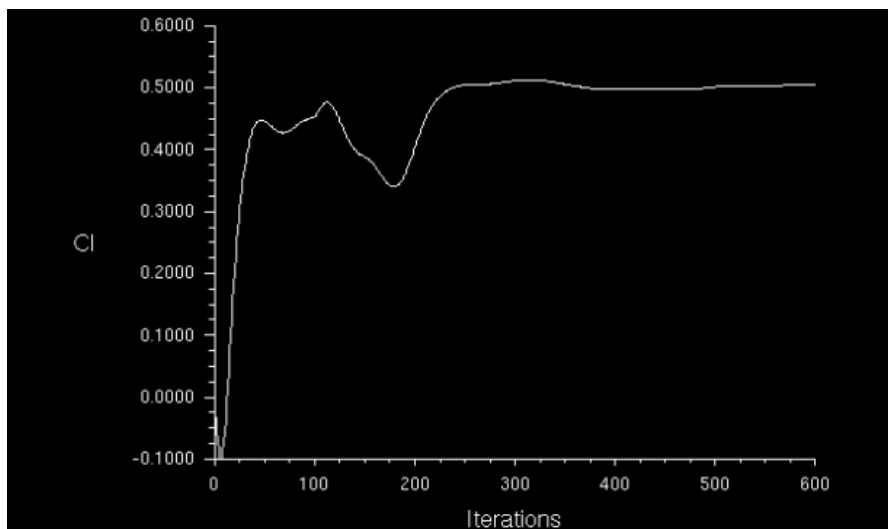


Figura C.3. Monitorització del coeficient de sustentació

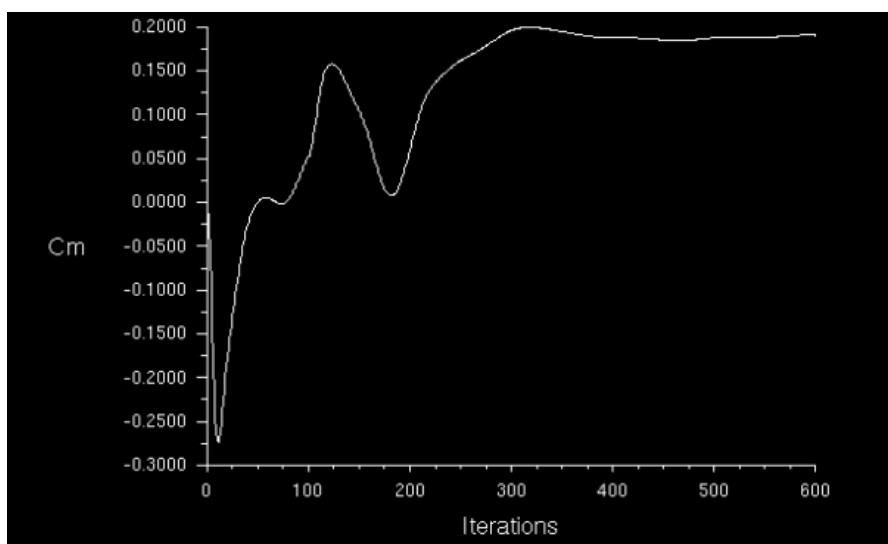


Figura C.4. Monitorització del coeficient del moment de capcineig

## C.2 Representació del camp de pressions

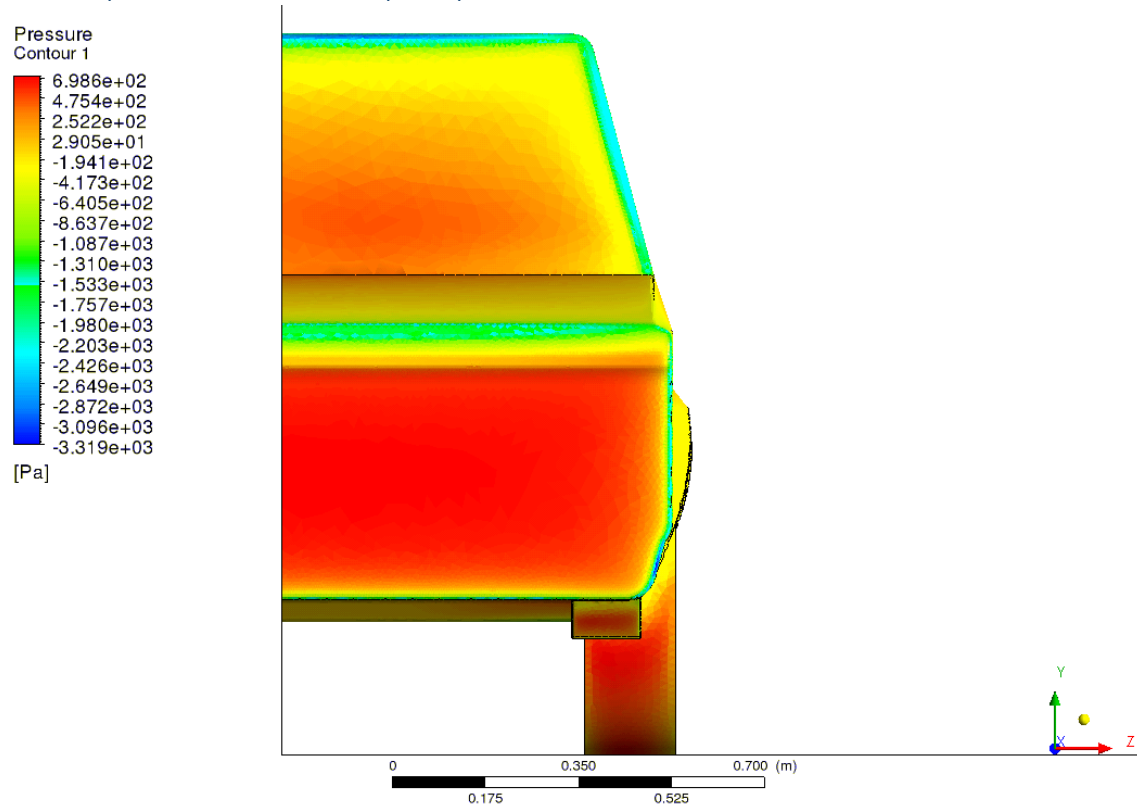


Figura C.5. Representació del camp de pressions

## C.3 Representació del camp de velocitats

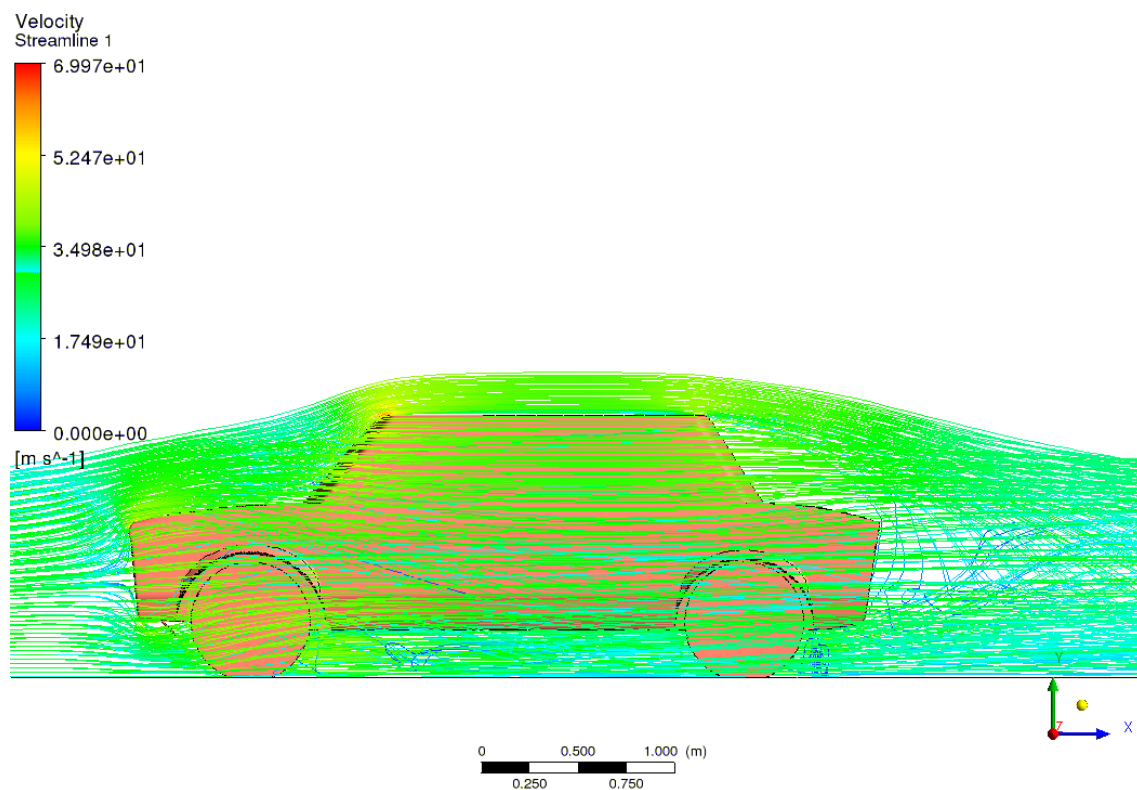


Figura C.6. Representació del camp de velocitats

## D. Tercera simulació

## D.1 Gràfic de residus i coeficients monitoritzats

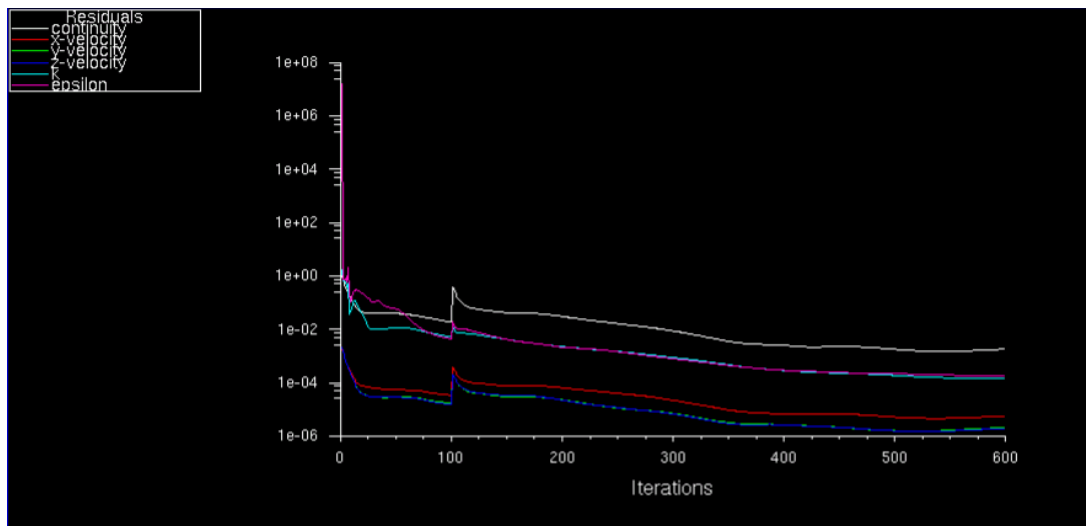


Figura D.1. Monitorització dels residus

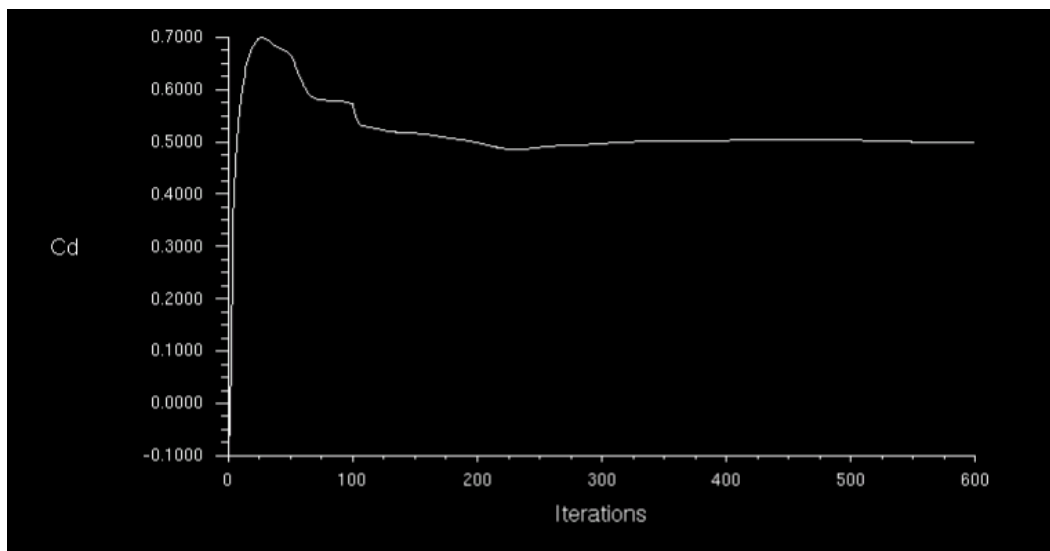


Figura D.2. Monitorització del coeficient de resistència a l'avanç

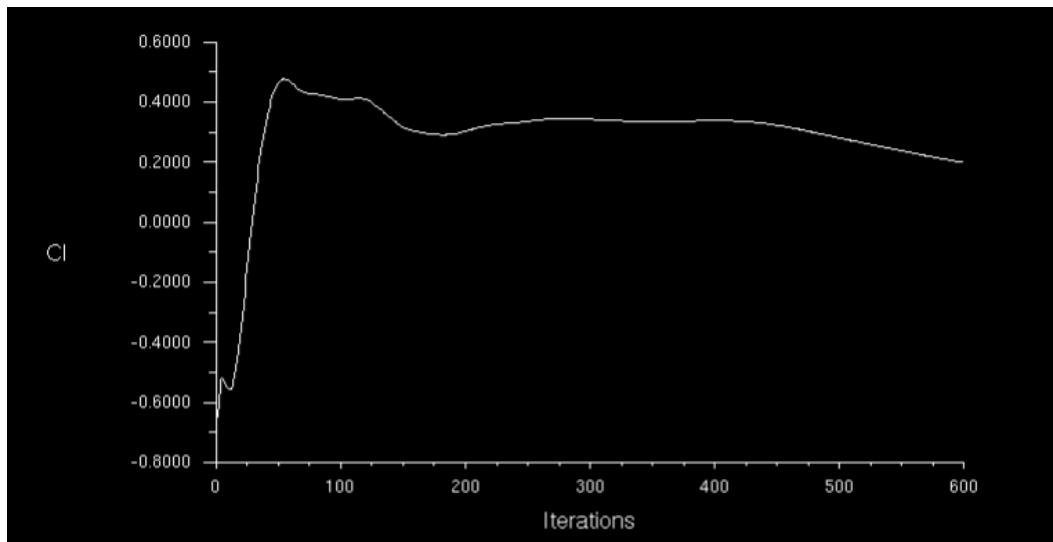


Figura D.3.. Monitorització del coeficient de sustentació

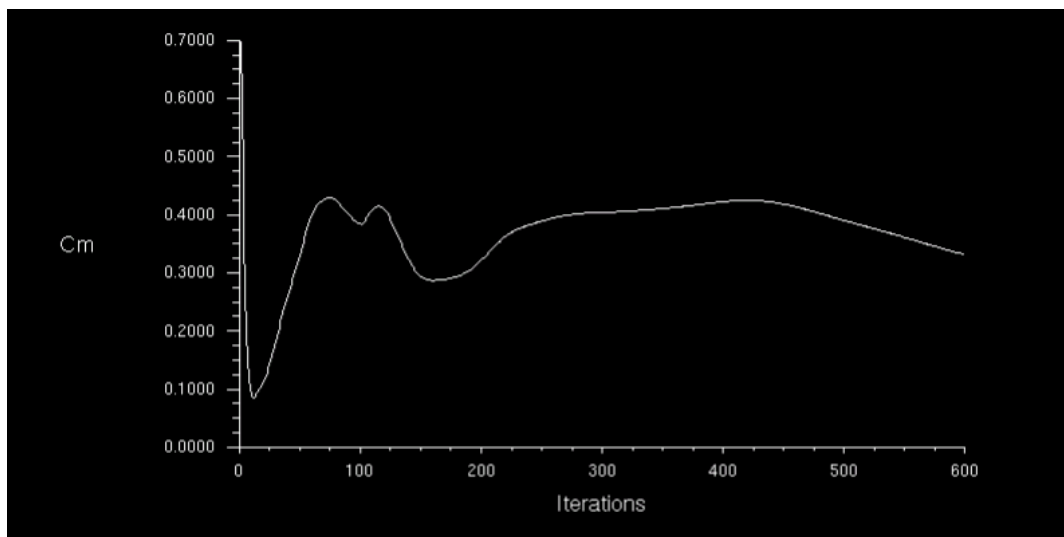


Figura D.4.. Monitorització del coeficient de moment de capcineig

## D.2 Representació del camp de pressions

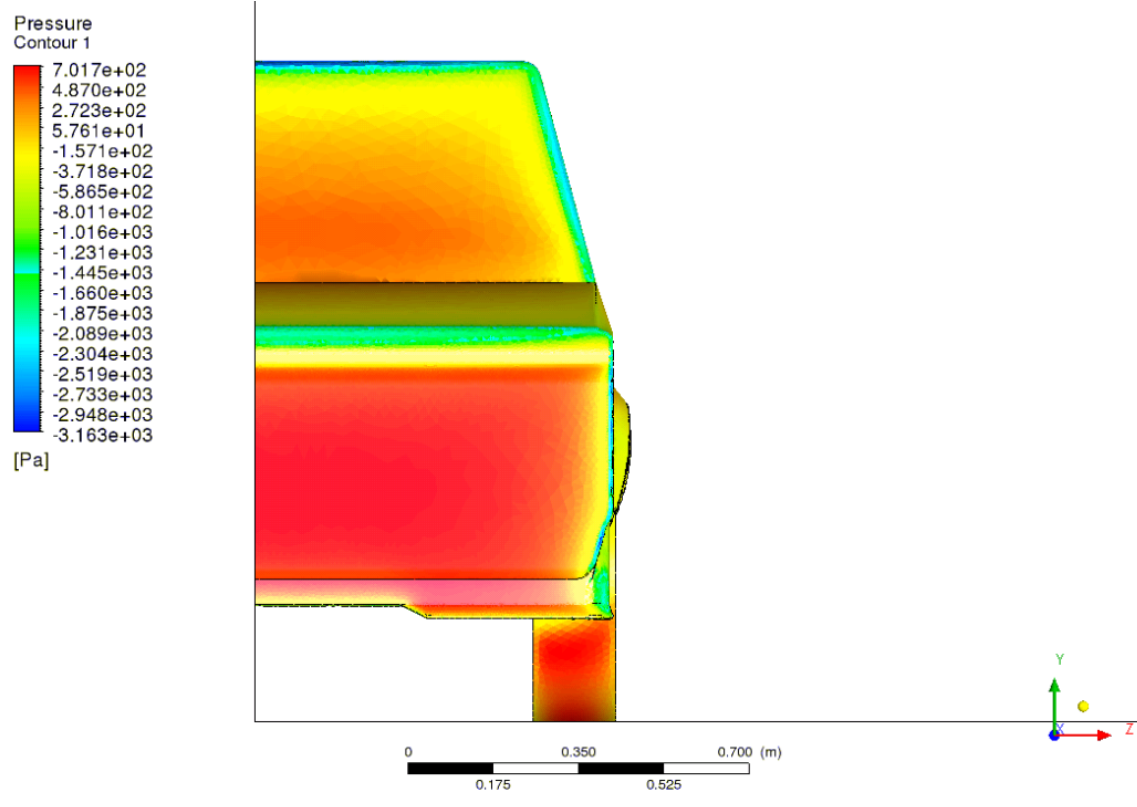


Figura D.5. Representació frontal del camp de pressions

## D.3 Representació del camp de velocitats

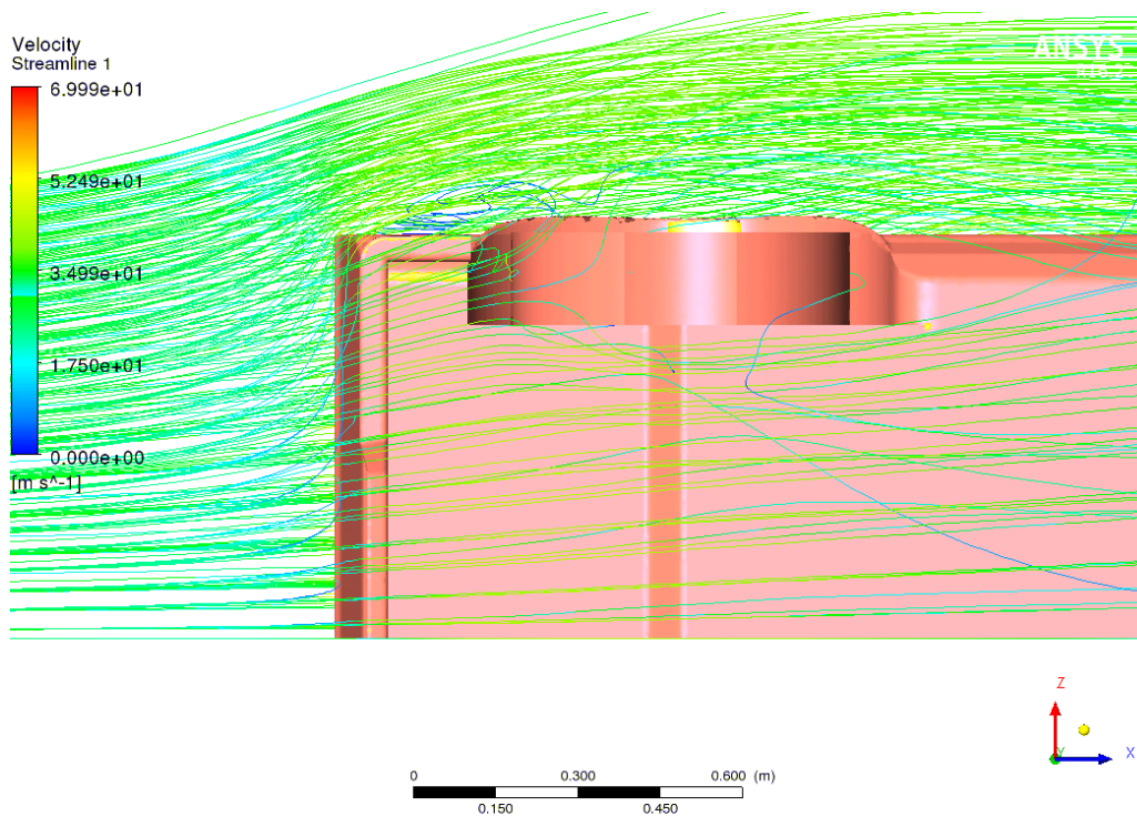


Figura D.6. Representació del camp de velocitats



## E. Quarta modificació

### E.1 Gràfic de residus i coeficients monitoritzats

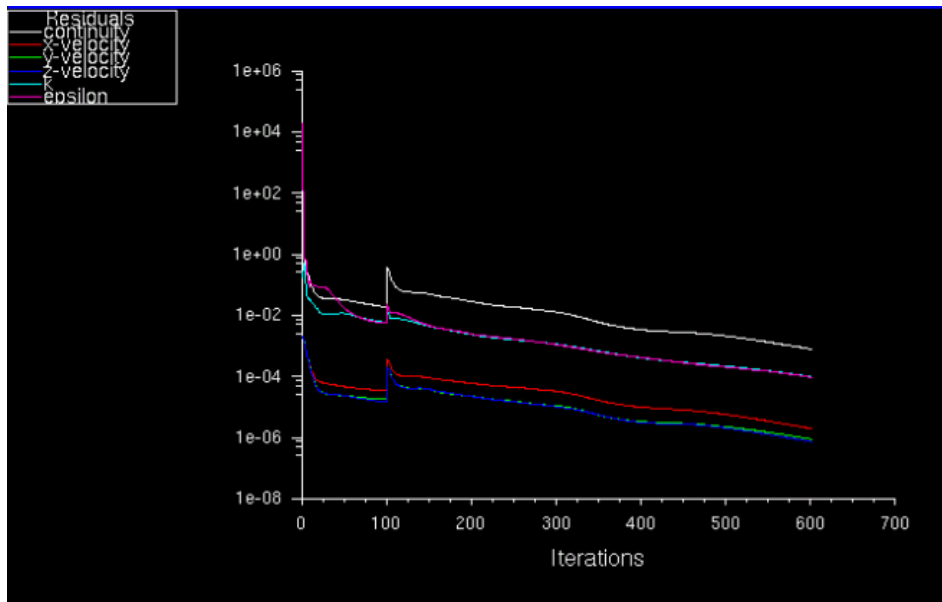


Figura E.1.. Monitorització dels residus

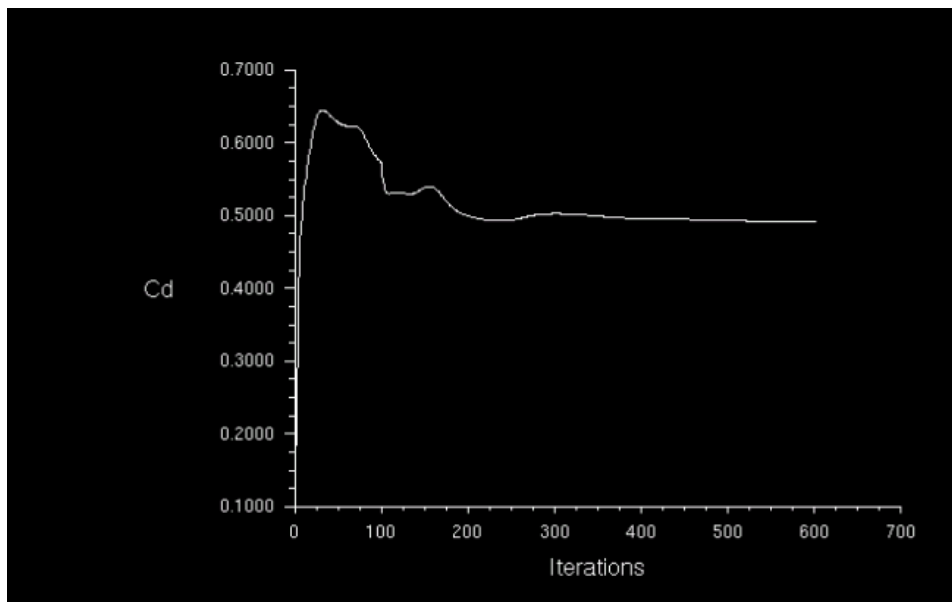


Figura E.2. Monitorització del coeficient de resistència a l'avanç

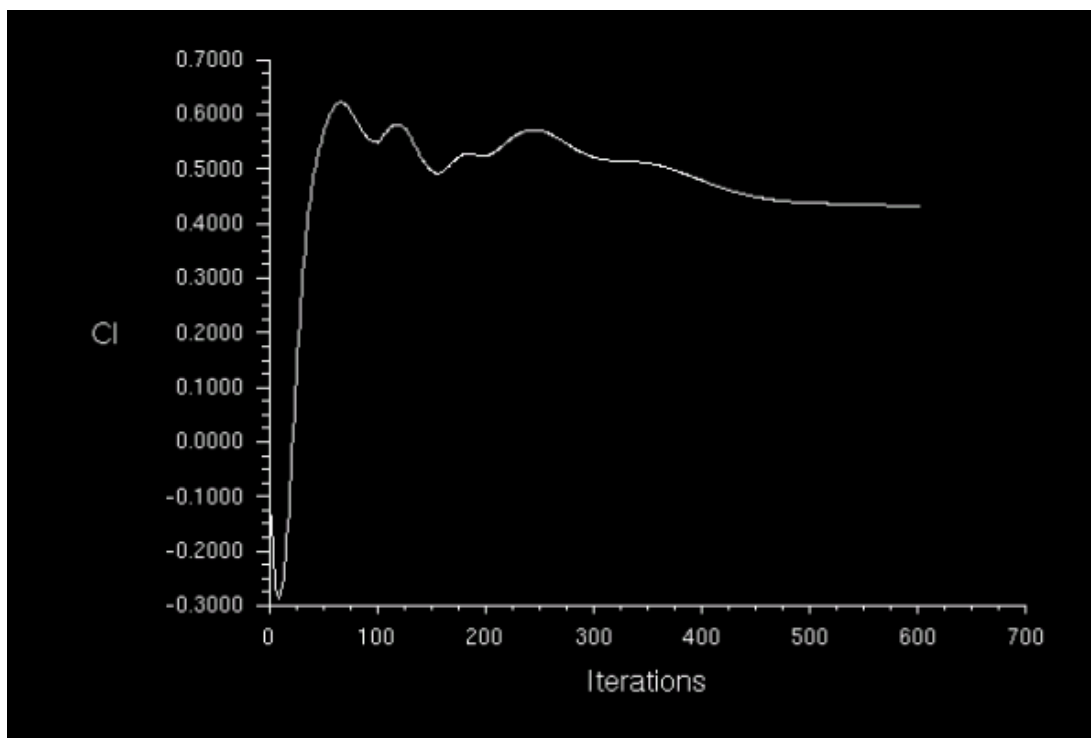


Figura E.3.. Monitorització del coeficient de sustentació

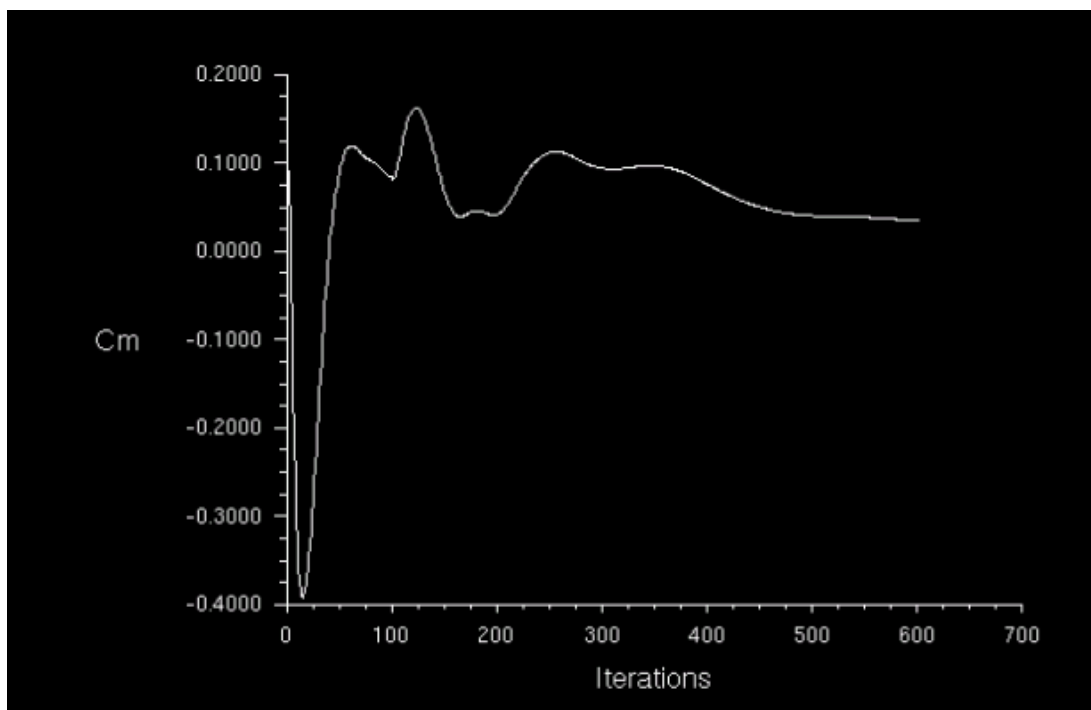


Figura E.4.. Monitorització del coeficient de moment de capcineig

## E.2 Representació del camp de pressions

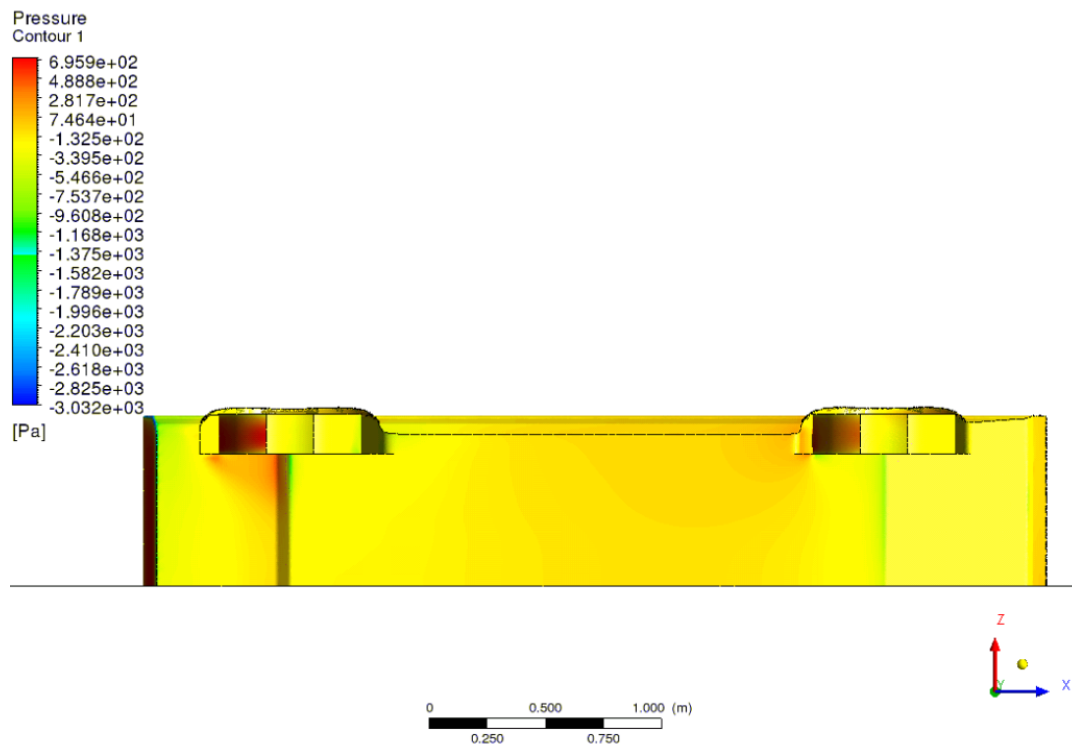


Figura E.5. Representació frontal del camp de pressions

## E.3 Representació del camp de velocitats

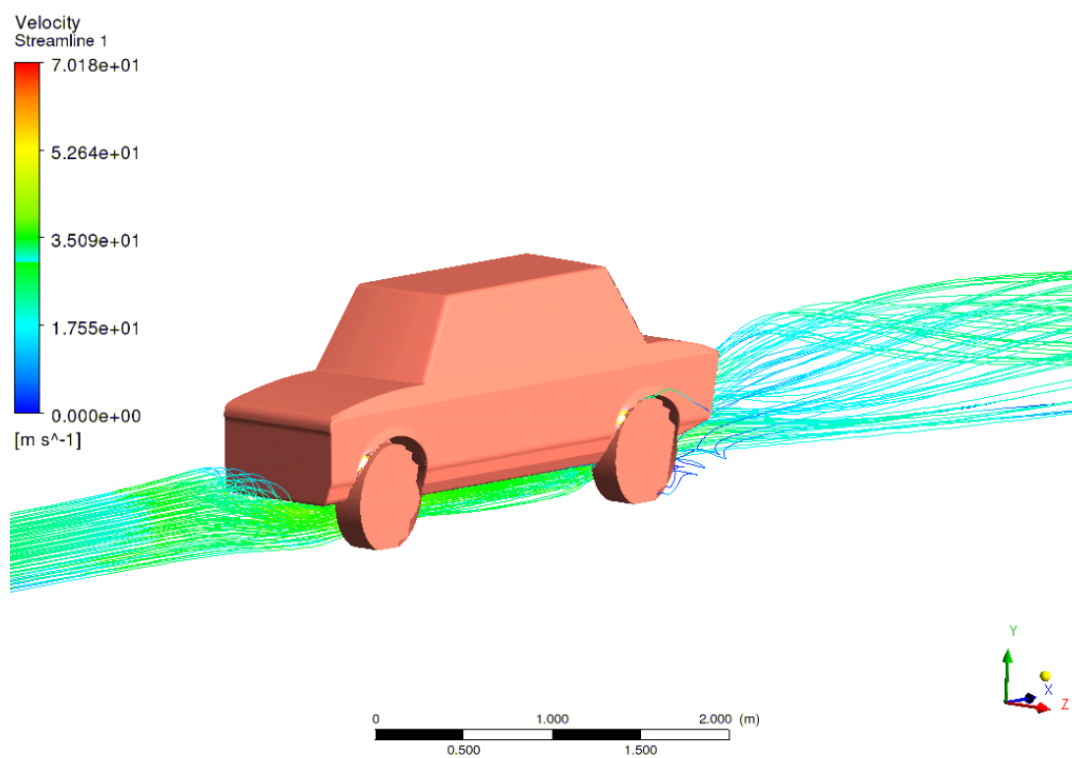


Figura E.6. Representació del camp de velocitats

## F. Cinquena modificació

## F.1 Gràfic de residus i coeficients monitoritzats

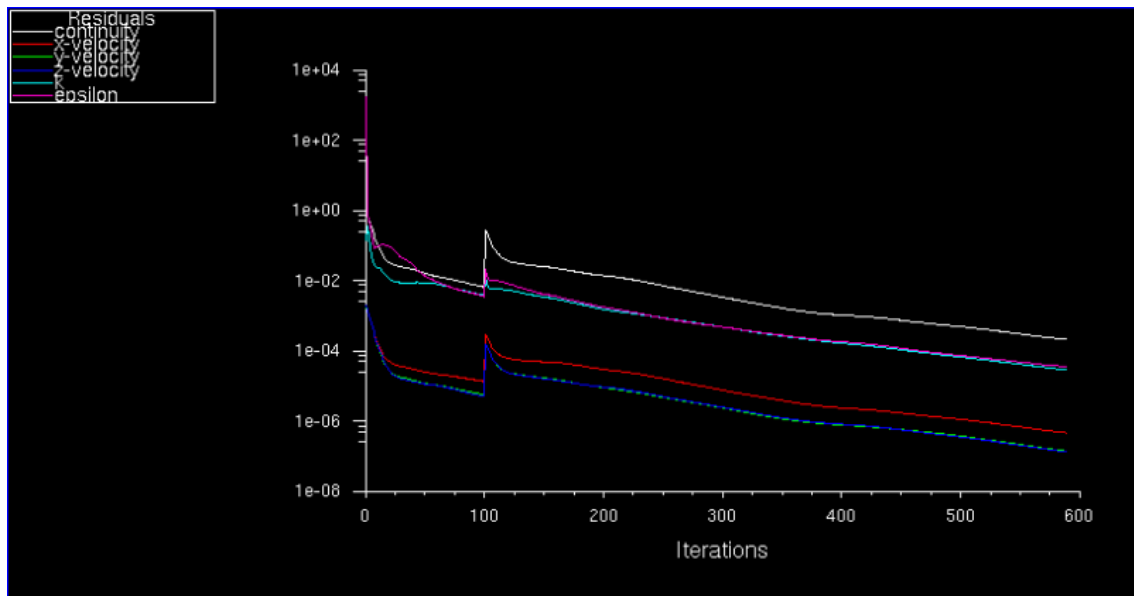


Figura F.1.. Monitorització dels residus

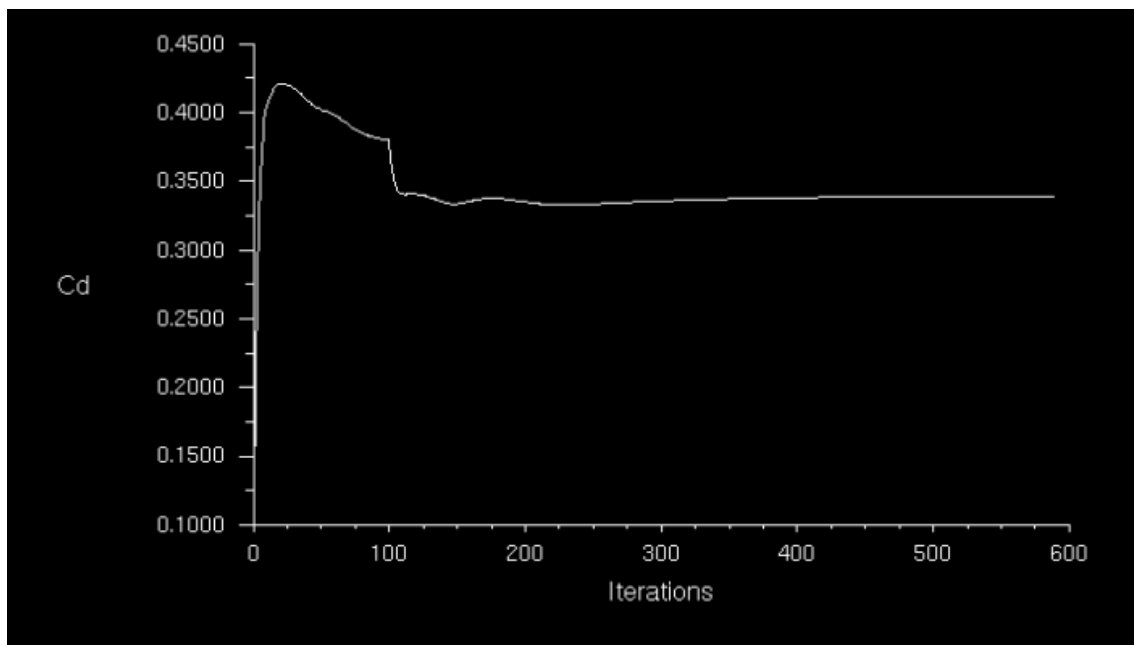


Figura F.2. Monitorització del coeficient de resistència a l'avanç

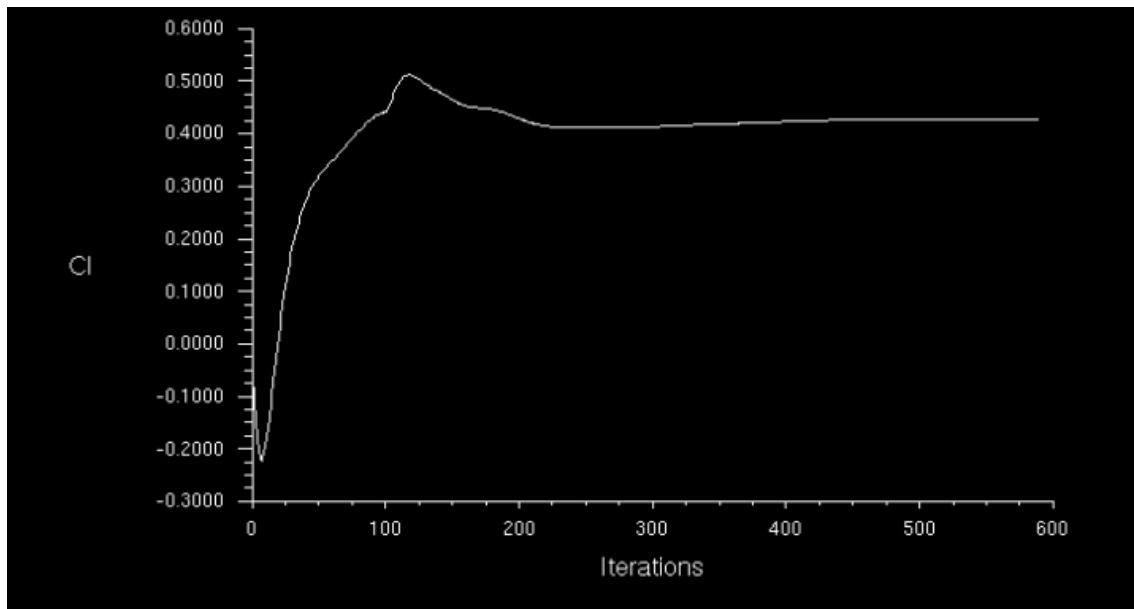


Figura F.3.. Monitorització del coeficient de sustentació

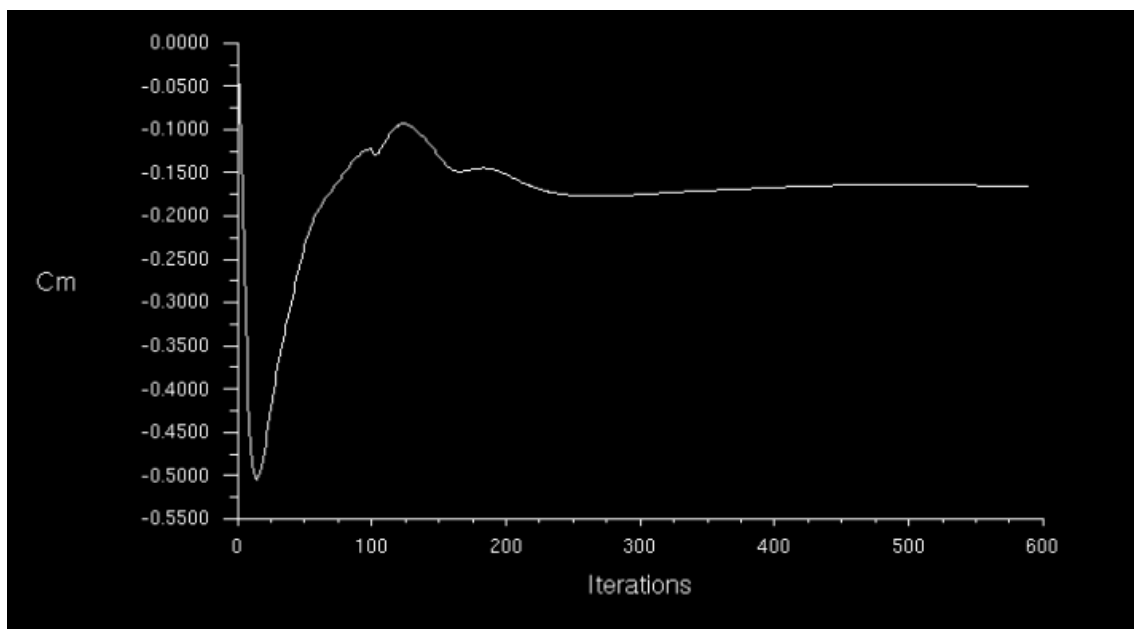


Figura F.4.. Monitorització del coeficient de moment de capcineig

## F.2 Representació del camp de pressions

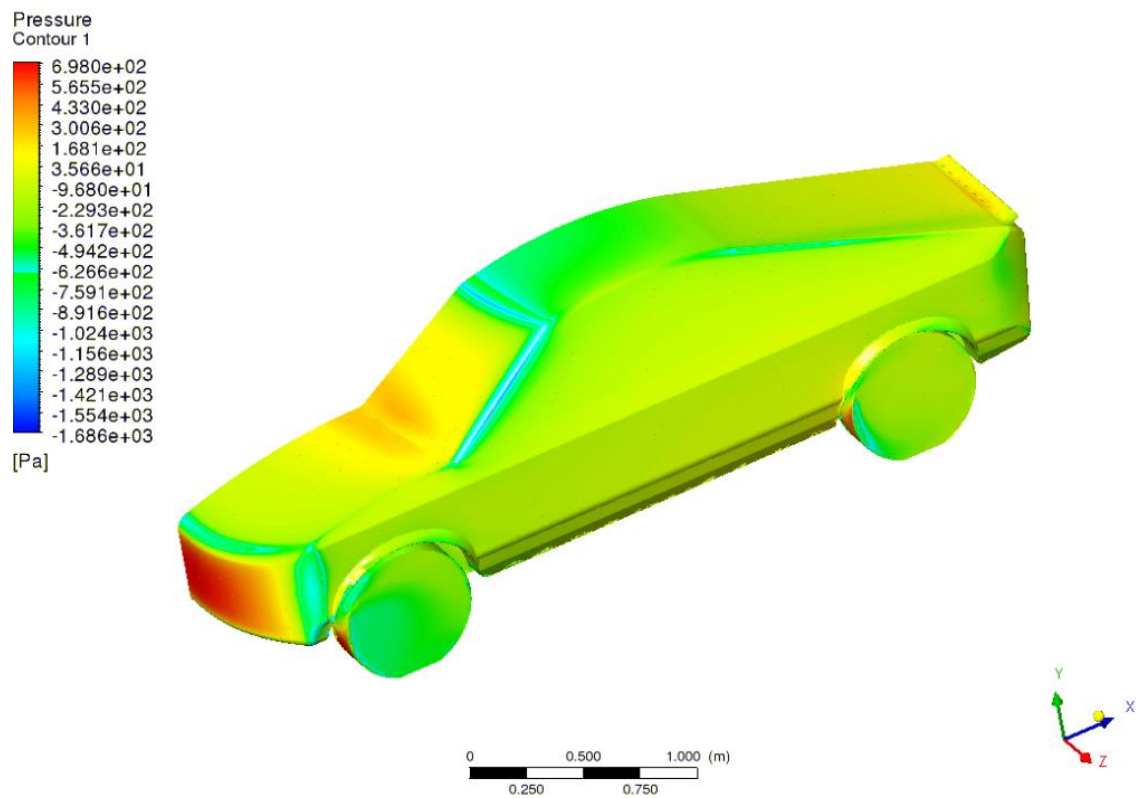


Figura F.5. Representació frontal del camp de pressions

## F.3 Representació del camp de velocitats

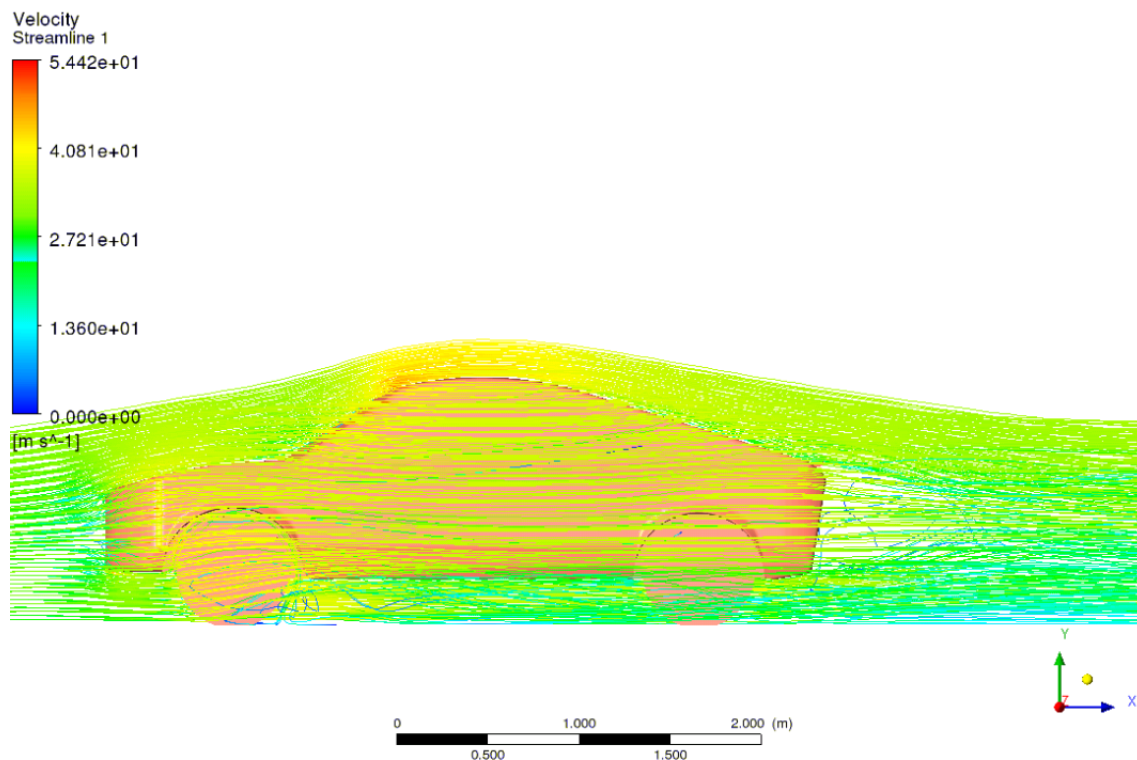


Figura F.6. Representació del camp de velocitats



## G. Sisena modificació

### G.1 Gràfic de residus i coeficients monitoritzats

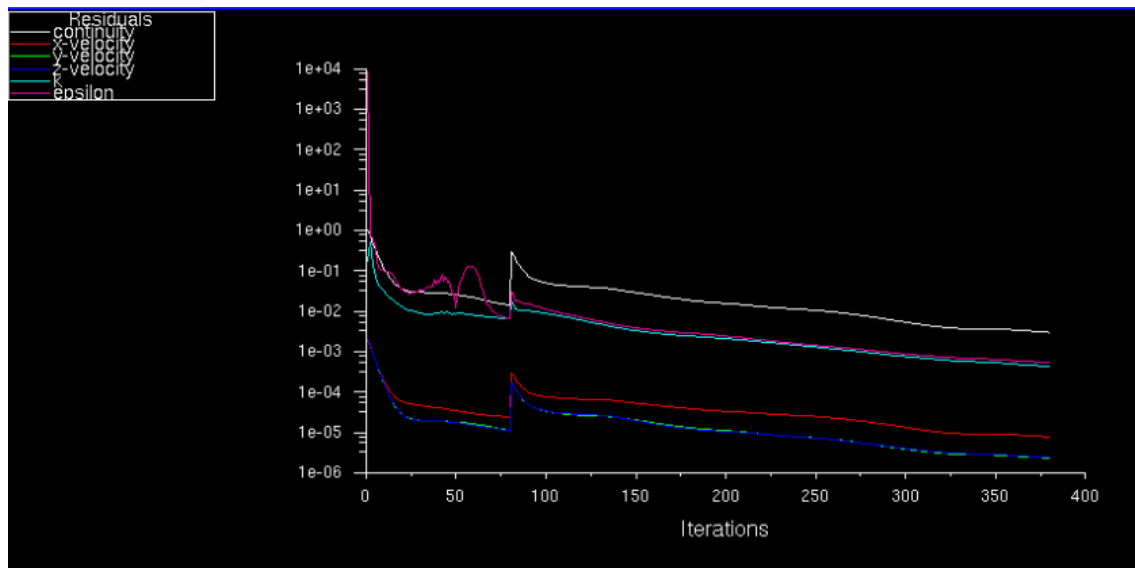


Figura G.1. Monitorització dels residus

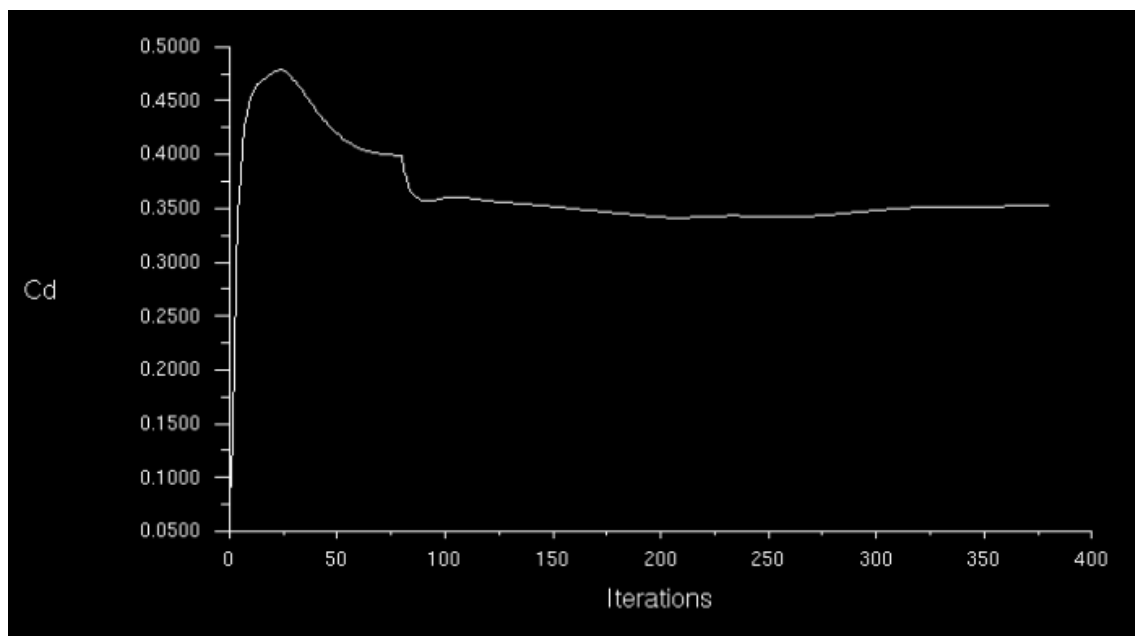


Figura G.2. Monitorització del coeficient de resistència a l'avanç

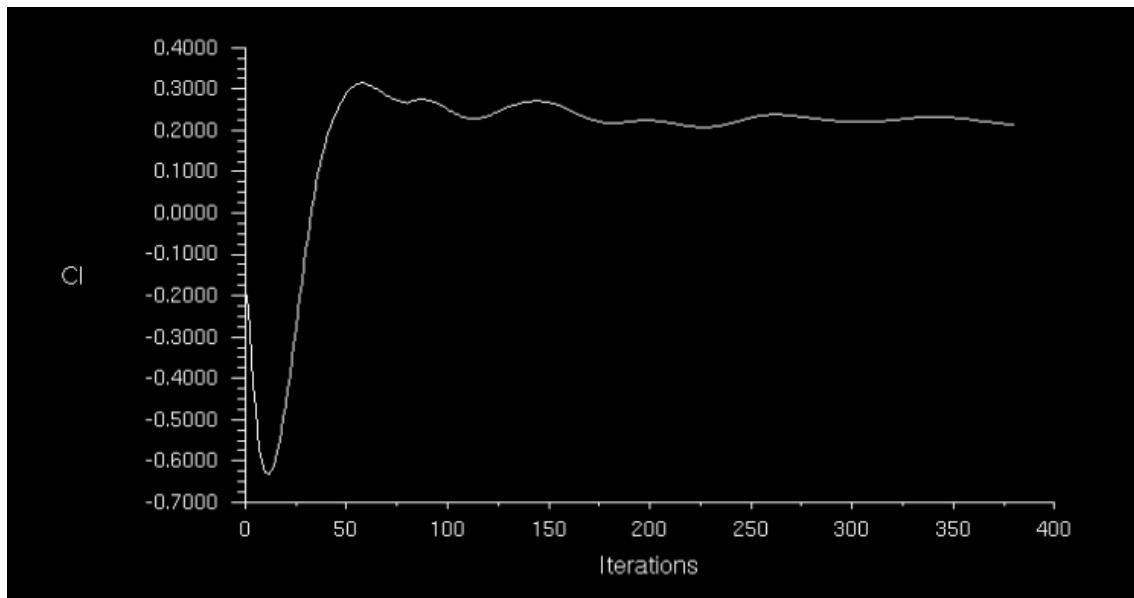


Figura G.3.. Monitorització del coeficient de sustentació

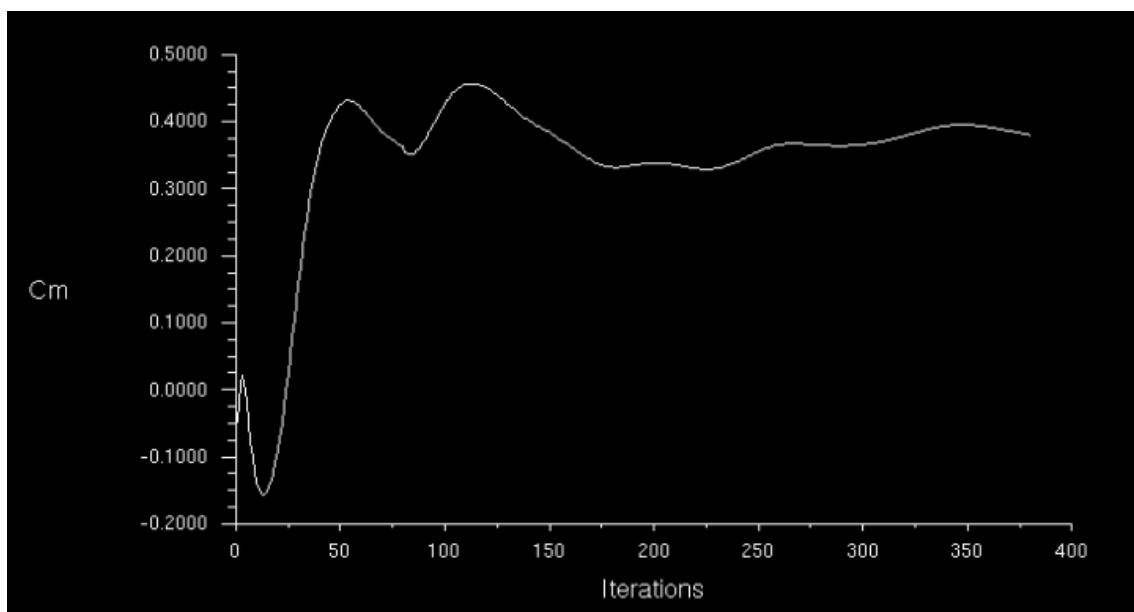


Figura G.4.. Monitorització del coeficient de moment de capcineig

## G.2 Representació del camp de pressions

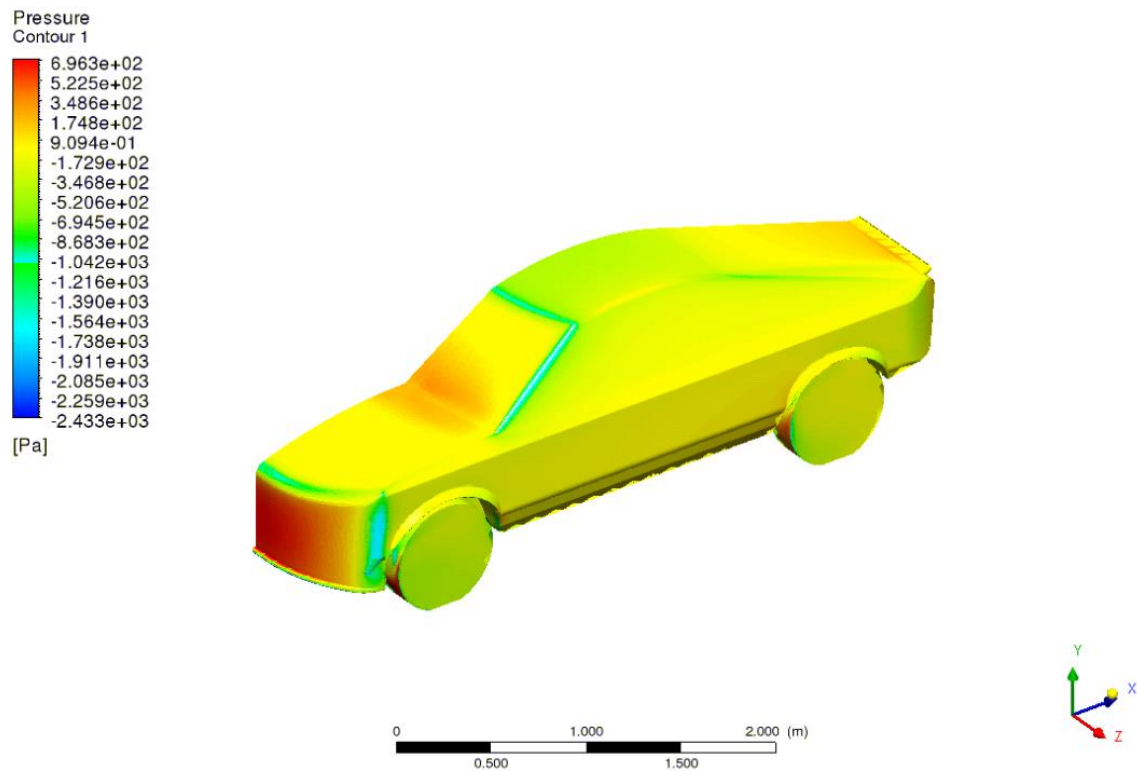


Figura G.5. Representació frontal del camp de pressions

## G.3 Representació del camp de velocitats

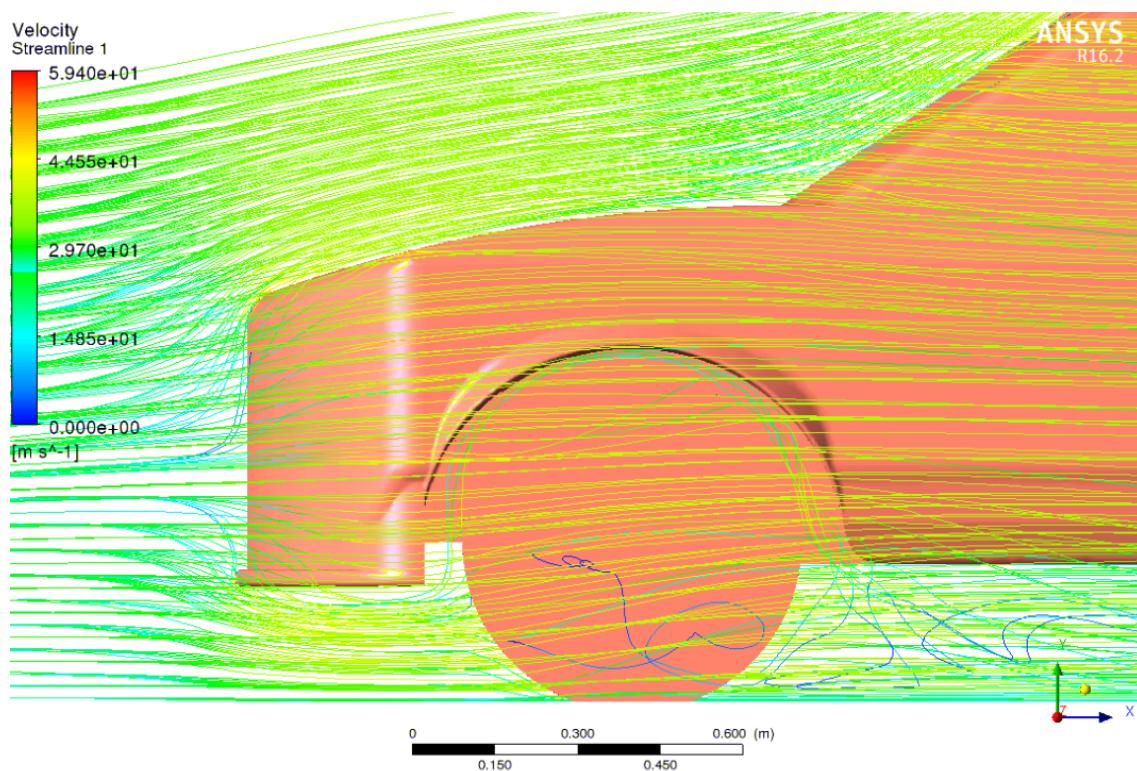


Figura G.6. Representació del camp de velocitats